

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Sveučilište u Zagrebu

# **ZAVRŠNI RAD**

Bojan Mihaljević

Zagreb, 2012.

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Sveučilište u Zagrebu

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:  
Prof. dr. sc. Josip Stepanić

Bojan Mihaljević

Zagreb, 2012.

## **Sažetak:**

U radu je opisana primjena vizualne metode, preciznije boroskopije, u ispitivanju komponenata turboventilatorskog motora (CFM56-5B), tijekom planiranog pregleda zrakoplova. Boroskopija se primjenjuje u raznim ispitivanjima stanja unutrašnjosti cijevovoda, lopatica rotora, komora za izgaranje, plinskih cilindara, malih spremnika, itd., gdje je teško provesti ispitivanje golim okom ili jednostavnim optičkim pomagalicama. Velika prednost boroskopije je kontrola određenog dijela bez potrebe za rastavljanjem cijelog motora ili dijela konstrukcije zrakoplova, što oduzima puno vremena i povećava troškove održavanja.

Prikazane su procedure i načini izvođenja boroskopije na svim pozicijama motora, s detaljnijim osvrtom na izvođenje ispitivanja lopatica visokotlačne turbine te analizu dobivenih rezultata (detekcije nepravilnosti u strukturi materijala).

## Popis slika:

Slika 1. Elektromagnetski spektar.....	2
Slika 2. Grafički prikaz veličine osvjetljenja .....	3
Slika 3. Svjetlo; a) reflektirano, b) lomljeno .....	4
Slika 4. Valna svojstva svjetlosti.....	4
Slika 5. Difuzna refleksija.....	5
Slika 6. Kruti endoskop - boroskop .....	7
Slika 7. Specifikacije sonde boroskopa.....	8
Slika 8. Fibroskop XLTM40 PRO Plus, korišten u ispitivanju .....	9
Slika 9. Princip prijenosa svjetlosti kroz optičko vlakno.....	10
Slika 10. Fleksibilna cijev fibroskopa XLTM40 PRO Plus.....	10
Slika 11. Upravljivi vrh fibroskopa sa zakretom od 360 stupnjeva i presjek .....	11
Slika 12. Sonda PXT650FF .....	12
Slika 13. Preporučena pozicija oka kod direktnog ispitivanja .....	14
Slika 14. Modularno projektirani motor, CFM56-5B.....	16
Slika 15. Skica zatvarača na kompresorskom i turbinskom dijelu motora .....	18
Slika 16. Otvor za boroskop u dijelu ventilatora i niskotlačnog kompresora .....	19
Slika 17. Pozicije boroskopa prilikom ispitivanja niskotlačnog kompresora .....	20
Slika 18. Otvori visokotlačnog kompresora.....	21
Slika 19. Komora izgaranja .....	23
Slika 20. Ispitivanje lopatica visokotlačne turbine i fibroskop.....	26
Slika 21. Skica sustava hlađenja visokotlačnog dijela turbine .....	27
Slika 22. Kontrolini zarezi .....	27
Slika 23. Presjek visokotlačne turbine.....	28
Slika 24. Fibroskop/videoskop XLTM40 PRO Plus, komplet s cijevi za pozicioniranje sonde.....	29
Slika 25. Provjera rezolucije fibroskopa (sonde).....	29
Slika 26. <i>Resolution Target</i> .....	30
Slika 27. Slika sa ručnog monitora .....	31
Slika 28. Dimenzija lopatice visokotlačne turbine .....	31
Slika 29. Fotometrija opreme .....	32
Slika 30. Otvori za boroskop i njihove lokacije, .....	33
Slika 31. Pozicije sonde kod ispitivanja lopatica visokotlačne turbine.....	34
Slika 32. Ispitivanje po 72-52-00-290-001.....	34
Slika 33. Vrh lopatice s kontrolnim zarezima, 72-52-00-290-001 .....	35
Slika 34. Izlazne ivice lopatica, 72-52-00-290-001 .....	35
Slika 35. Otvor za boroskop; za Zadatak 72-52-00-290-001.....	36
Slika 36. Moguće nepravilnosti na lopaticama rotora visokotlačne turbine.....	36
Slika 37. Nepravilnosti na vrhovima lopatica visokotlačne turbine .....	37
Slika 38. Položaj sonde kod ispitivanja napadnih ivica lopatica .....	37
Slika 39. Primjeri rezultata ispitivanja, 72-52-00-290-002 .....	38
Slika 40. Ispitivanje lopatica s prednje strane (iz komore izgaranja, 72-52-00-290-002) .....	38
Slika 41. Presjek i položaj pomoćnog reduktora.....	39
Slika 42. Aktuator ( <i>Accessory Gearbox</i> ) .....	40
Slika 43. Specifikacije lopatica visokotlačne turbine.....	41

**Popis tablica:**

Tablica 1. Optička sredstva.....	5
Tablica 2. Specifikacije sonde fibroskopa.....	11
Tablica 3. Udaljenosti izvora od površine osvijetljene sa 500 lx.....	15

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
$\Phi$	svjetlosni tok	[lm]
$E$	osvijetljivost	[lx]
$I$	jakost svjetlosti / intenzitet	[cd]
$F$	frekvencija	[Hz]
$L$	duljina	[m]
$t$	vrijeme	[s]
$\lambda$	valna duljina	[m]
$v$	brzina	[m/s]
-	učinkovitost izvora svjetlosti	[lm/W]

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno korištenjem stečenih znanja, vještina i potrebne literature pod voditeljstvom prof. dr. sc. Josipa Stepanića i ing. Daniela Gudeka. Zahvaljujem avioinženjeru (ZIM) Davoru Drobnjaku na pomoći u ispitivanju i analizi rezultata ispitivanja, te tvrtki *Croatia Airlines* koja mi je omogućila dostupnost potrebnoj opremi i prostorijama tijekom izrade ovog rada.

## Sadržaj

<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Općenito o vizualnom ispitivanju .....</b>	<b>2</b>
2. 1. Fotometrija .....	2
2. 2. Optička sredstva .....	5
2. 3. Radne upute kod ispitivanja.....	13
<b>3. Boroskopijski motor CFM56-5B.....</b>	<b>16</b>
3. 1. Otvori za boroskop .....	17
3. 2. Definicije stanja površine.....	18
3. 3. Boroskopsko ispitivanje ventilatora i niskotlačnog kompresora.....	19
3. 4. Boroskopsko ispitivanje visokotlačnog kompresora .....	21
3. 5. Boroskopsko ispitivanje komore izgaranja .....	22
3. 6. Boroskopsko ispitivanje mlaznica (lopatice statora) visokotlačne turbine.....	24
3. 7. Boroskopsko ispitivanje niskotlačne turbine .....	25
<b>4. Vizualno ispitivanje komponente – lopatice visokotlačne turbine .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Analiza rezultata ispitivanja .....</b>	<b>45</b>
<b>7. Zaključak .....</b>	<b>50</b>
<b>8. Literatura .....</b>	<b>51</b>
<b>9. Prilozi</b>	



## 1. Uvod

U procesu održavanja zrakoplova, detaljno vizualno ispitivanje - boroskopija, najznačajniji je element za *On Condition Monitoring*, odnosno logiku održavanja kojom se prate stanja dijelova, komponenti, konstrukcije, proizvoda ili cijelog sustava zrakoplova (pogonska grupa). Ovom logikom održavanja smanjuje se broj nepotrebnih zamjena uporabljivih komponenti, kojima je prije bio propisan životni vijek (*Life Limited Parts*). Time je smanjeno trajanje i ukupni trošak održavanja. Sve češćim pregledima stanja komponenata, stječe se veće iskustvo oko određivanja granica iskoristivosti, a raste i razina pouzdanosti sustava. Uvođenjem nerazornih ispitivanja u održavanju zrakoplova, pregledi su postali jednostavniji, jeftiniji i brži. Više nije bilo potrebno rastavljati zrakoplove do najsitnijih dijelova, te je smanjen broj bačenih i nepotrebno zamjenjenih ispravnih komponenti s lažnim indikacijama, a visoki zahtjevi u praćenju stanja mogli su biti zadovoljeni korištenjem različitih metoda nerazornog ispitivanja.

Za vrijeme eksploatacije zrakoplova, dijelovi mlaznog motora su jako opterećeni, kako dinamički tako i toplinski, stoga je potrebno pažljivo praćenje rada motora kako bi se spriječili eventualni otkazi i kvarovi, te povećala pouzdanost i efikasnost rada motora. Složenost motora dodatno otežava praćenje stanja i preglednost komponenti. U tu svrhu postoje razni otvori kako bi se što lakše pristupilo unutrašnjosti motora, i njegovim komponentama. Zato je jedan od najčešćih radova na motoru upravo boroskopija, kojom se jednostavno i brzo prilazi te analizira stanje svih vrsta lopatica, komora izgaranja i raznih drugih dijelova.

Tijekom linijskog održavanja (*Line Maintenance*) turboventilatorskih motora, traže se nepravilnosti i kontroliraju se pouzdanosti komponenti motora. Turboventilatorski (*turbofan*) motor je dvoprotočni motor (dvije struje zraka) koji ostvaruje silu potiska tako što ispušta vruće plinove izgaranja velikom brzinom. Ukupna struja zraka se prvo stlači pomoću prednjeg ventilatora (*fan*), nakon kojeg dio zraka ulazi u kompresor, a dio obilazeći jezgru motora, odlazi u atmosferu ili ulazi u prostor iza turbine miješajući se s ispušnim plinovima prije ulaska u mlaznice. Ispitivanjima se provjerava ulaze li pronađene nepravilnosti u dozvoljene granice sigurnosti, propisane u priručnicima održavanja (AMM – *Aircraft Maintenance Manual*). U linijskom održavanju, specifično motora CFM56-B, proizvođač propisuje šest radnih zadataka *Condition Monitoringa*, a to su [3]: *Trend Monitoring* (praćenje rada/specifičnih parametara motora preko centralnog računala), *Borescope Inspections* (detaljni vizualni pregledi), *Particle Analysis* (kontrola/analiza filtera, magnetskih čipova, praćenje količine stranih čestica u sustavu ulja i goriva), *S.O.A.P.* (spektrometrija ulja iz rezervoara - analiza kemijskog sastava i strukture ulja), *Pilot and Post Flight Reports Retrieved From Aircraft* (praćenje rada motora preko zapisa pilota i mehaničara u letu i nakon slijetanja) i *Hard Time Component Monitoring* (praćenje životnog vijeka određenih komponenti). Motor se u slučaju pronalaska nepravilnosti ili greške, koja prelazi dopuštene granice, mora rastaviti, a komponenta s greškom zamijeniti.

Sve izvršene akcije na motoru, dok je rastavljen, spadaju u tzv. bazno održavanje (*Heavy Maintenance ili Base Maintenance*), čiji su zahtjevi na pouzdanost puno striktniji od zahtjeva linijskog održavanja. Svi rastavljeni dijelovi motora predstavljaju priliku ispitivačima za detaljnije pregledavanje, jer je pristup nekim komponentama moguć jedino dok je motor rastavljen. Motori ovog tipa nemaju planiranih generalnih pregleda (*Overhaul*), što bitno smanjuje troškove održavanja. Rad motora na krilu je predviđen dok se ne dogode veći kvarovi ili dok ne istekne limit komponente.

U radu je detaljnije opisana boroskopija lopatica visokotlačne turbine motora CFM56-5B, na jednom linijskom pregledu zrakoplova *Airbus A319*. Ispitivanje je provedeno u prostorima tvrtke *Croatia Airlines* u nekoliko navrata, tijekom vremenskog perioda od listopada 2011. g. do svibnja 2012. g.

## 2. Općenito o vizualnom ispitivanju

Vizualno ispitivanje je jedna od metoda nerazornog ispitivanja. Ovom metodom promatramo i procjenjujemo stanje površine ispitnog objekta, koristeći vidljivi dio spektra elektromagnetskog zračenja. Promatrati se može „golim okom“ (*direktna tehnika*) ili pomoću optičkih sredstava (*posredna tehnika*), kada je onemogućen pristup ispitnoj površini. Vizualna metoda ispitivanja, osim što može biti zasebna metoda, dio je i drugih, često primjenjivih metoda nerazornih ispitivanja, kao što su penetrantska i magnetska metoda, pa se može zaključiti da vizualna metoda predstavlja osnovu u nerazornom ispitivanju.

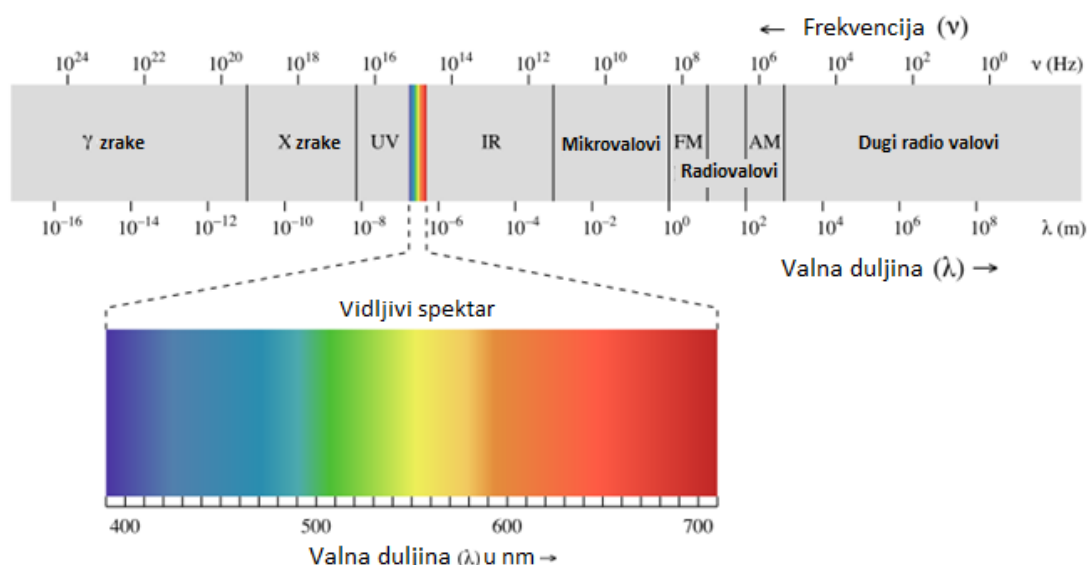
Često se prilikom ispitivanja zahtijeva detaljnija procjena stanja, stoga se dodatno koriste optička sredstva kojima se može uvećati područje ispitivanja.

Vizualno ispitivanje je široko primjenjivo, pogotovo u industriji. Načini ispitivanja su, bez obzira u kojoj se industriji provode, vrlo slični. Pomoću vida se, s optičkim sredstvima ili bez njih, procjenjuje stanje ispitnog objekta. Ispitivanje se provodi u svim fazama procesa proizvodnje. Od ispitivanja sirovih materijala i njihovih mikrostruktura, preko stanja alata, peći, kalupa u samoj proizvodnji, do ispitivanja gotovih komponenata.

Vizualno ispitivanje je najčešće u primjeni tijekom eksploatacije. Ispitivanjem se traže pukotine prilikom zamora i puzanja materijala, znakovi korozije, erozije, abrazije, mehaničkog oštećenja, trošenja i loše obrade, te različite vrste deformacija materijala.

### 2. 1. Fotometrija

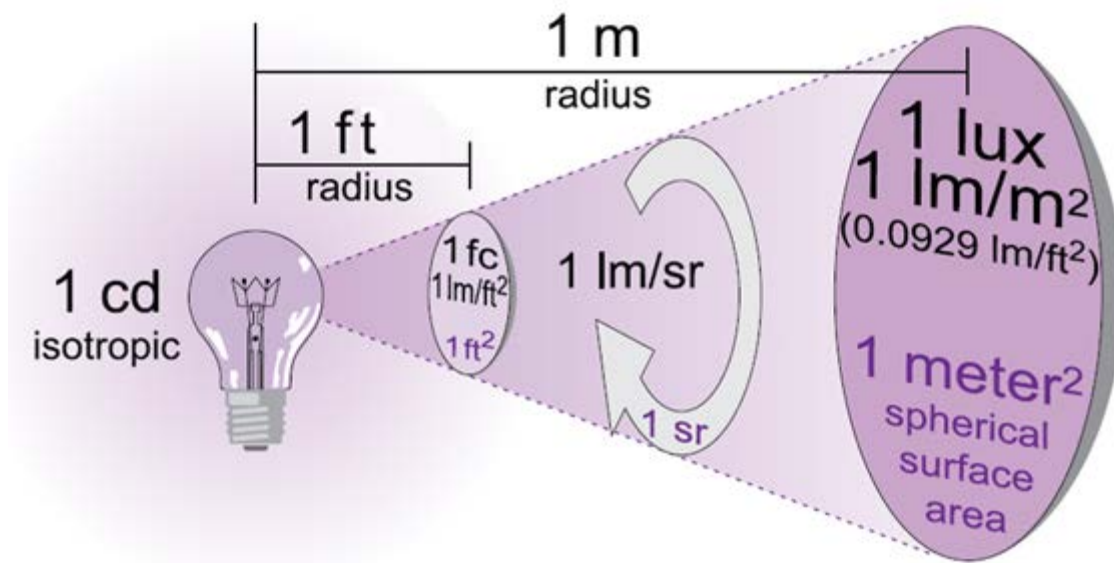
Svjetlost je elektromagnetsko zračenje valnih duljina vidljivih ljudskom oku. Valne duljine se nalaze u rasponu od oko 380 nm do 770 nm. *Fotometrija* je dio optike koja se bavi mjerenjem svjetlosnog toka i osvijetljenosti površine, a mjerenja provodimo pomoću *fotometra*.



Slika 1. Elektromagnetski spektar

U fotometriji svjetlost opisujemo pomoću fotometrijskih veličina. Fotometrijske veličine opisuju svjetlost na temelju efekta osvijetljenosti i ograničene su samo na vidljivi spektar zračenja.

Fotometrijske veličine su one koje pratimo u vizualnom ispitivanju. To su svjetlosni tok, intenzitet svjetla, svjetljinost (luminacija) i osvjetljenost (iluminacija) (Tablica 1 u dodacima).



Slika 2. Grafički prikaz veličine osvjetljenosti <sup>1</sup>

Kod ispitivanja bitan parametar za pravilno ispitivanje i dobivanje točnih rezultata, je osvjetljenost površine. *Osvjetljenost* je mjerilo za količinu svjetlosnog toka koja pada na određenu površinu, tj. kuglinu ljusku. Mjerna jedinica je lux (lx), a jedan lux je osvjetljenost jedinične površine udaljene 1 m od izvora svjetla jakosti 1 cd. Pri tome je uvjet da izvor jakosti 1 cd emitira 1 lumen (lm) svjetlosnog toka po steradianu<sup>2</sup> u svim smjerovima (izotropno) [9].

$$E = \frac{\phi \text{ [lm]}}{A \text{ [m}^2\text{]}}, \quad [\text{lx}]$$

gdje su  $\phi$  svjetlosni tok izvora, a  $A$  površina na koju svjetlost dolazi. *Svjetlosni tok* je energija koju emitirana izvor tijekom jedne sekunde. Sa slike 2 se može vidjeti kako gustoća svjetla (po ft<sup>2</sup>) opada udaljavanjem od izvora. Tako imamo 1 lm/ft<sup>2</sup> na udaljenosti 1 ft, a na udaljenosti 3,281 ft (1 m) gustoća svjetla koja nailazi na 1 m<sup>2</sup> iznosi 0,0929 lm/ft<sup>2</sup> [9].

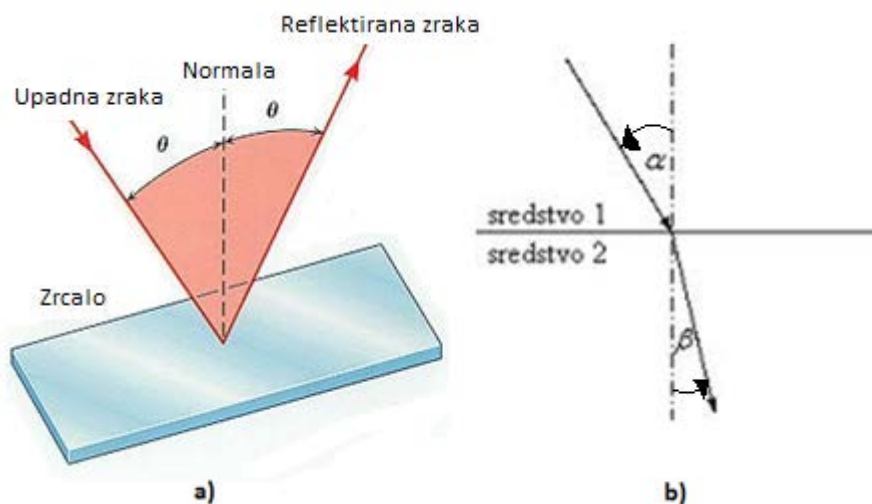
Svjetlo može biti *reflektirano*, *lomljeno*, *difraktirano* i *polarizirano*. Elektromagnetska zračenja, između ostalog i svjetlost, imaju tri veličine koje ih opisuju. To su *valna duljina*, *frekvencija* i *brzina*. Valna duljina svjetlosti je obično iskazana u nanometrima (nm), a frekvencija u Hertz-ima (Hz) ili period u sekundi (1/s). Brzina je umnožak frekvencije i valne duljine:

$$v = f \cdot \lambda$$

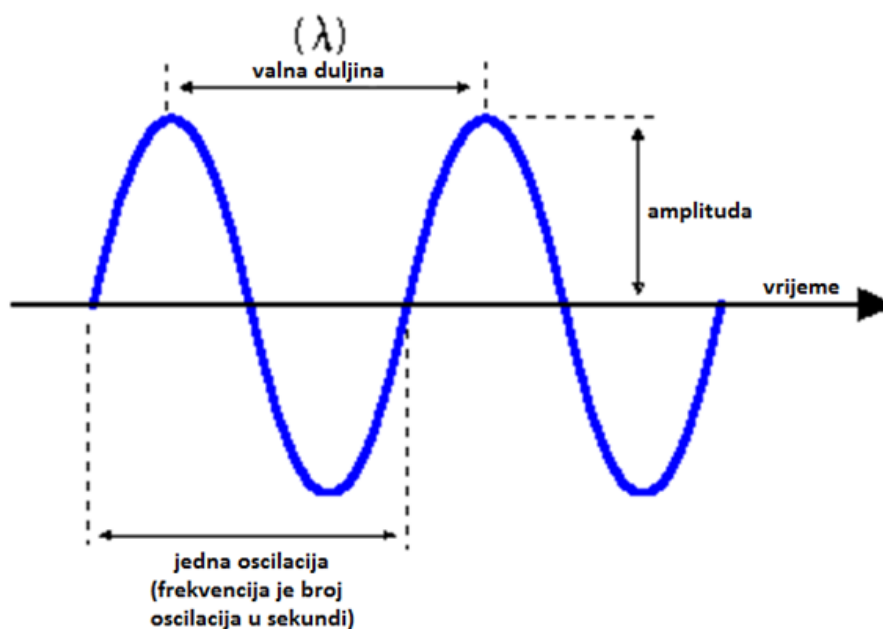
U optici, kao području fizike, koja proučava svojstva svjetlosti i njezinog međudjelovanja s materijom postoje dvije vrlo bitne pojave u vizualnom ispitivanju. To su *refleksija* ili *odbijanje*, te *refrakcija* ili *lom*.

<sup>1</sup> na slici: jedinica fc (foot-candle) jednaka je 10,764 lx, ili približno 10 lx

<sup>2</sup> Steradian je ugao što ga zatvara stožac s vrhom u središtu kugle koji na njezinoj plohi omeđuje dio plohe takav da mu je ploština jednaka ploštini kvadrata kojemu je stranica jednaka polumjeru te kugle



Slika 3. Svjetlo; a) reflektirano, b) lomljeno



Slika 4. Valna svojstva svjetlosti

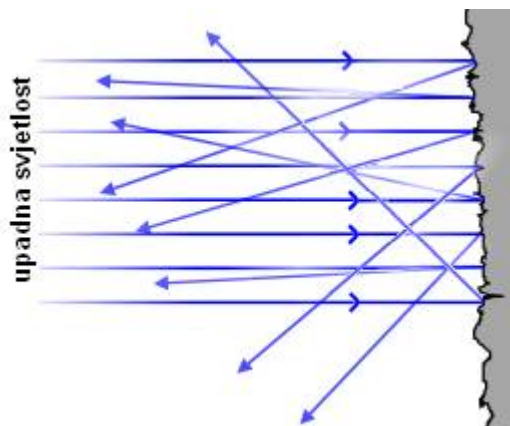
## Refleksija

Refleksijom se podrazumijeva odbijanje zrake svjetlosti kod nailaska na granicu dva sredstva, pod određenim kutom. Postoje dva uvjeta kod refleksije:

1. Upadna zraka svjetlosti, normala na površinu i reflektirajuća zraka, nalaze se u istoj ravnini.
2. Kut refleksije i upadni kut su jednaki ( $\theta$ ).

Refleksija se dijeli na *pravilnu* i *difuznu*. *Pravilnom refleksijom* se na poliranoj, glatkoj površini sve upadne zrake reflektiraju pod istim kutem, kao što je slučaj kod zrcala na slici 3, a).

Kod hrapavih površina dolazi do *difuzne refleksije*. Oba uvjeta refleksije i dalje vrijede, ali zbog različitih smjerova normala u točkama površine, što je posljedica hrapavosti, dolazi do razlike u smjerovima reflektirajućih zraka.



Slika 5. Difuzna refleksija

### Lom svjetlosti, *Snell-ov zakon*

Kod transparentih (prozirnih) predmeta, samo je mali dio upadne svjetlosti reflektiran. Ostatak svjetlosti prelazi u novi medij u novom smjeru, odnosno dolazi do loma svjetlosti, kao na slici 3. b). Koliko se zraka lomi, ovisi o svojstvima dva sredstva kroz koje zraka prolazi i upadnom kutu. Ovu pojavu objašnjava *Snell-ov zakon* koji kaže da je omjer sinusa upadnog kuta i kuta loma konstantan.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{konst.}$$

## 2. 2. Optička sredstva

Kod posredene tehnike ili detaljnijeg vizualnog ispitivanja koriste se različita optička sredstva, pomagala i instrumenti, radi lakšeg pristupa ispitnom objektu ili površini, te dobivanja preciznijih rezultata, gdje je to potrebno.

Pomagala	Instrumenti
<ul style="list-style-type: none"> <li>povećala (lupe)</li> <li>ogledala</li> <li>prizme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kruti endoskopi - boroskopi</li> <li>fleksibilni endoskopi - fibroskopi</li> <li>videoskopi = endoskop + video sustav</li> <li>mikroskopi</li> </ul>

Tablica 1. Optička sredstva

Video kamere, specijalna oprema, te sustavi za snimanje i računala, danas su uobičajena u vizualnom ispitivanju i često dolaze u kompletu s endoskopom, tzv. *video endoskop (videoskop)*. Vizualno ispitivanje u zrakoplovstvu je kompleksno, s vrlo strogim zahtjevima na pouzdanost ispitivane komponentne, pa se pomoću dodatnog video sustava cijeli proces ispitivanja puno olakšava. Osnovna oprema video sustava uključuje kameru, kontrolnu jedinicu, TV monitor i opremu za analizu (procesor) koja sprema slike izvršenog ispitivanja. Ako je potrebno, te slike kasnije može detaljno

pregledavati i više licenciranih ispitivača zbog bolje procjene rezultata. Isto tako, kod loših vanjskih uvjeta tijekom ispitivanja, rad se može snimiti i kasnije, u zatvorenom, detaljno analizirati. Nedostaci video endoskopa su visoke cijene opreme, te ograničena prenosivost kompleta s kojim dolazi endoskop.

Povećala ili lupe, imaju mogućnost povećavanja slike od 1,5x do 10x. Mijenjanjem udaljenosti lupe od površine, kontroliramo fokus. Za još detaljnija ispitivanja, koriste se mikroskopi (*Low-powered Microscopes*, *Medium-powered Microscopes*, stereoskopski - 3D prikaz) koji mogu povećati sliku i do 2000x (*High-powered Microscopes*) [1].

Mikroskopi mogu imati izvor svjetlosti iza ili ispred uzorka. Kod prozirnih uzoraka izvor se nalazi iza, te svjetlost prolazi kroz uzorak i ulazi u objektiv. Kod neprozirnih predmeta svjetlost pada na površinu i reflektira se nazad u objektiv.

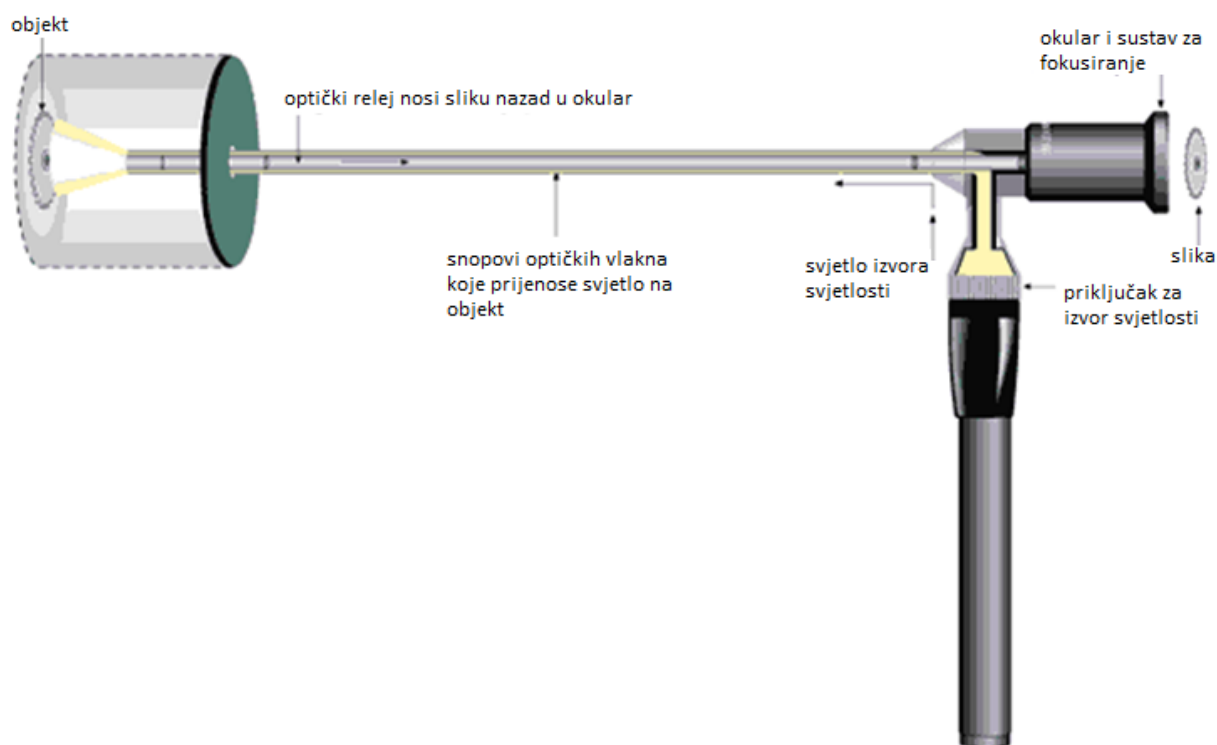
## Instrumenti

### Kruti endoskopi - boroskopi

Boroskopi su instrumenti s ugrađenim vlastitim sustavom osvjetljenja, i prijenose sliku do oka ispitivača, preko krute cijevi koja spaja okular i objektiv (sondu). U cijevi se nalazi sustav povezanih optičkih leća okruženih optičkim vlaknima, koja prijenose svjetlost za osvjetljenje ispitnog objekta. Boroskopi su primarno bili proizvedeni za ispitivanje cijevi pušaka, a s vremenom se primjena širila na različite djelatnosti gdje se ispitivanje pokazalo potrebnim. Stalnim razvojem tehnologije, ubrzo nakon boroskopa proizveden je napredniji instrument - fibroskop. U početku je bio vrlo skup, dok mu je danas cijena pristupačnija. Upravo su zato boroskopi danas sve više zamjenjivani naprednijim fibroskopima, pa tako i u zrakoplovstvu. Zato će kasnije u radu biti više riječi o fibroskopu i njegovim prednostima u odnosu na boroskop.

Na slici 6, prikazan je boroskop standardne konstrukcije, koji je najčešće u uporabi. Osim ovog boroskopa postoje i različite konstrukcije. Pa tako još postoje panoramski boroskop (vidno polje od 360°), vodonepropusni boroskopi, kutni boroskopi, širokokutni boroskopi (vidno polje od 120°), minijturni boroskopi (mali promjer cijevi), periskop, UV boroskop, kalibrirajući boroskopi.

Oprema koja dolazi u kompletu boroskopa standardne konstrukcije sastoji se od različitih sonda, okulara s povećalom, nastavaka za optička vlakna i priključaka za video sustave po izboru.



Slika 6. Kruti endoskop - boroskop

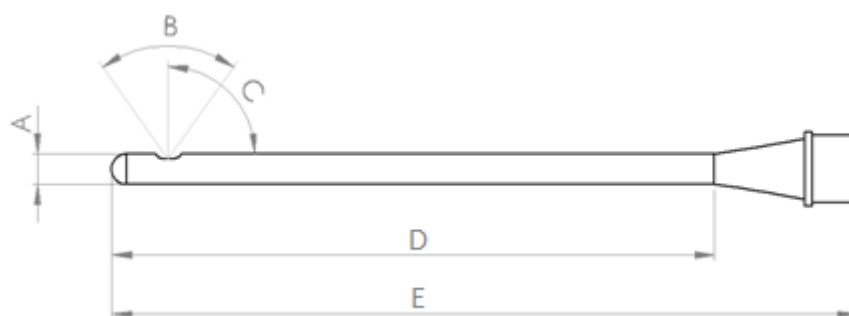
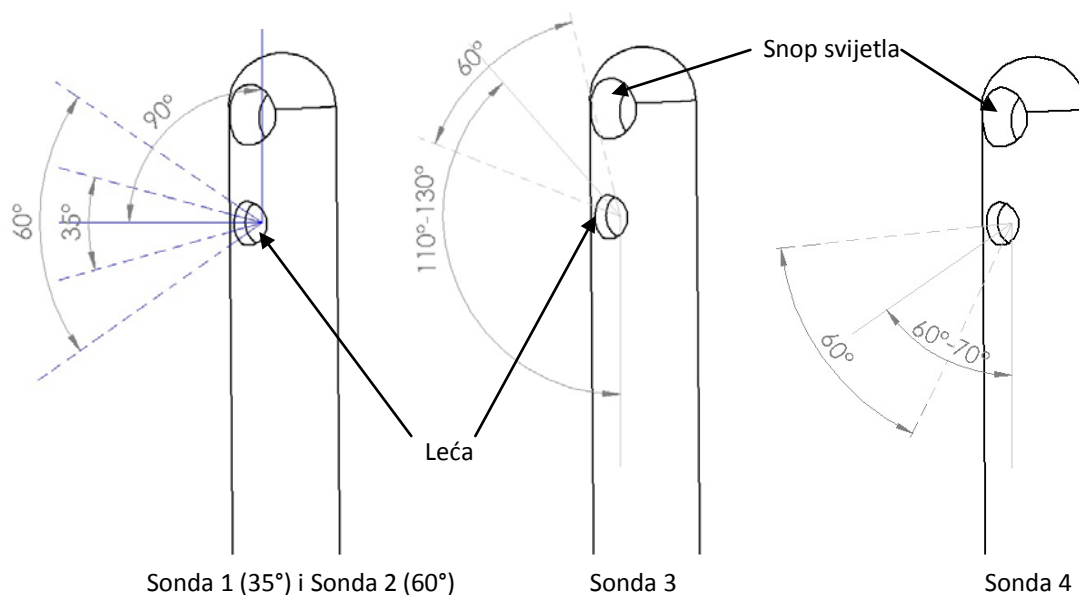
### Sonde boroskopa

Sonda 1 (crna) se primarno koristi za ispitivanje komore za izgaranje i sapnica visokotlačne turbine. Ova sonda ima promjenjivi fokus, i mogućnost velikog povećavanja slike. Pogled je pod kutom od  $90^\circ$ , a vidno polje iznosi  $35^\circ$ .

Sonda 2 (žuta) je univerzalna sonda. S kutom pogleda od  $90^\circ$  i vidim poljem od  $60^\circ$ , primarno se koristi za opći pregled motora. Može biti korištena kod svih boroskopskih ulaza na motoru.

Sonda 3 (zelena) je sonda s kutnim pogledom od  $110^\circ$  do  $130^\circ$ , i vidnim poljem od  $60^\circ$ . Koristi se u pregledu lopatica visokotlačnog kompresora.

Sonda 4 (plava) je sonda s kutnim pogledom, od  $60^\circ$  do  $70^\circ$ . Služi uglavnom za pregled vrhova lopatica i kućišta.



A - promjer sonde boroskopa

D - duljina sonde

B - vidno polje sonde

E - ukupna duljina (sonda + nastavak)

C - položaj/kut pogleda

Slika 7. Specifikacije sonde boroskopa

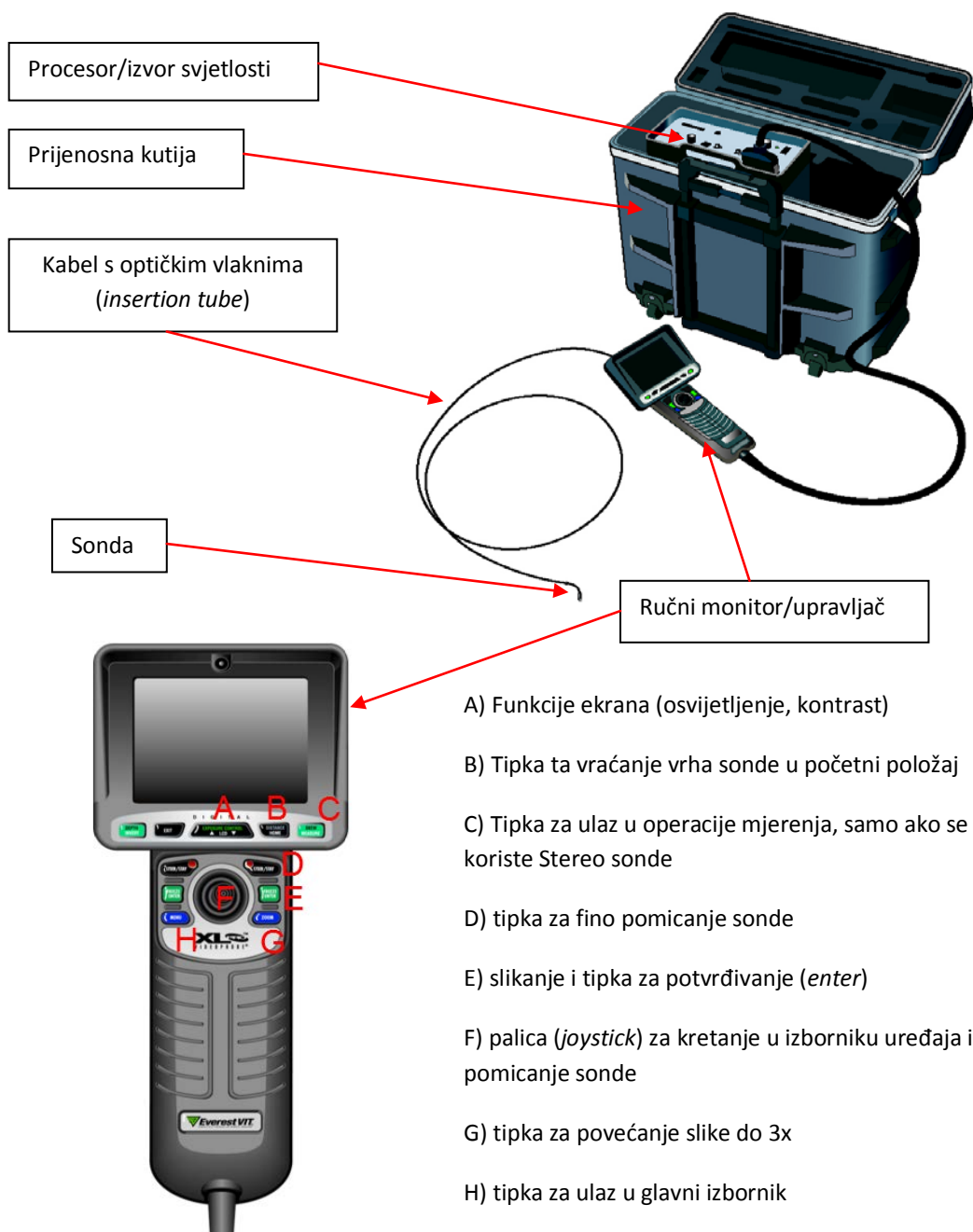
## Fleksibilni endoskopi, fibroskopi

Fibroskopi su instrumenti koji prijenose sliku do oka ispitivača preko fleksibilne cijevi između objektiva i okulara. U cijevi se nalaze snopovi tankih i savitljivih optičkih vlakna, zbog kojih je cijev fleksibilna. Fibroskopi, kao i boroskopi, imaju ugrađen i vlastiti sustav osvjetljenja. Kroz optička vlakna se prijenosi emitirano svjetlo iz izvora u jednom, i slika ispitne površine u drugom smjeru, tj. prema okularu. Zahvaljujući refleksiji svjetlosti unutar savitljivih optičkih vlakna, omogućuje se prijenos slike i svjetlosti oko prepreka bez korištenja dodatnih optičkih sredstava. U nastavku je obrađen videoskop *XLTM40 PRO Plus*, kojim je provedeno ispitivanje u ovom radu. Princip rada fibroskopa i ovog videoscopa je skoro identičan. Razlika je jedino u okularu, umjesto kojeg se nalazi ručni monitor spojen s procesorom za snimanje i obradu podataka ispitivanja. Radi jednostavnosti, ovaj će se videoskop dalje u radu nazivati fibroskop.



Fibroskop se u zrakoplovstvu koristi prilikom ispitivanja svih dijelova zrakoplova do kojih je se ne može doći fizički ili pomoću boroskopa. Inspektor s fibroskopom može usmjeriti sondu na određeno mjesto unutar motora. Sonda zajedno s fleksibilnom cijevi, ima mogućnost zakreta od 360°. Malog je promjera, dovoljnog za ulaz u sve boroskopske otvore na motoru, a cijev je dugačka za pristup svim ispitnim površinama motora. Sve to čini veliku prednost fibroskopa u odnosu na boroskop. Zato je upravo fibroskop najčešće u primjeni tijekom vizualnog ispitivanja u održavanju zrakoplova.

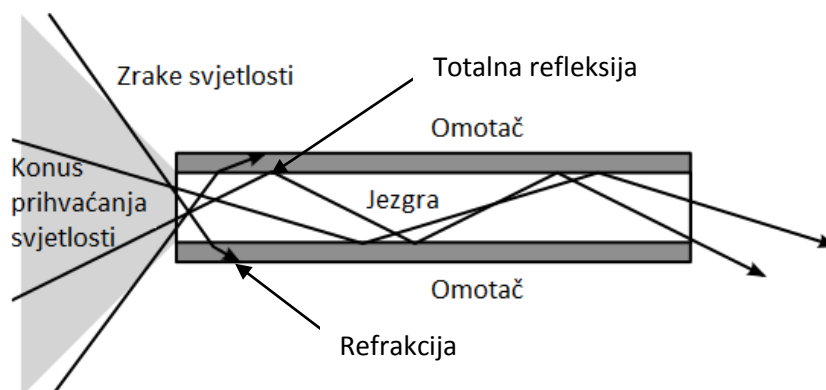
Za dobre karakteristike fibroskopa, bitan je pravilan izbor elemenata kao što su vlakna, sonde i projektor.



Slika 8. Fibroskop XLTM40 PRO Plus, korišten u ispitivanju

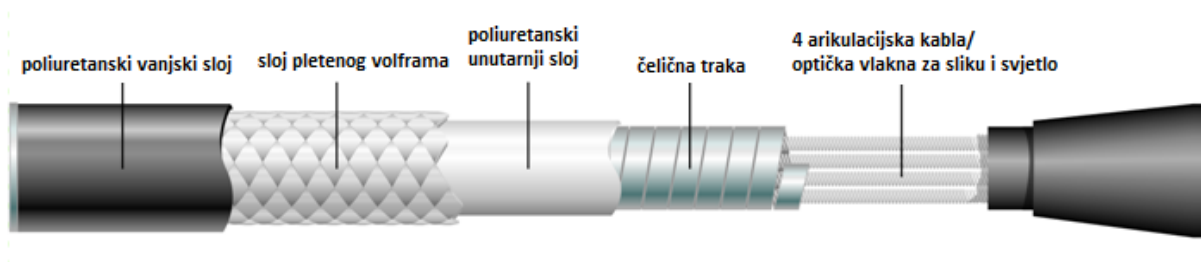
## Optička vlakna

Optička vlakna su elementi potrebni za prijenos svjetlosti. Vlakno se sastoji od visoko kvalitetnog optičkog stakla u jezgri i stakla različitog indeksa loma u ovojnici vlakna. Zbog velikih upadnih kuteva svjetlosnih zraka i različitih indeksa loma u vlaknu, dolazi do totalne refleksije svjetla. Na taj se način svjetlost prijenosi kroz fleksibilnu cijev. U poprečnom presjeku, vlakno je jako malo i ne može provoditi svu potrebnu svjetlost. Zato se vlakna, njih više tisuća, grupiraju u snopove, te tako prenose veći stupanj osvijetljenja.

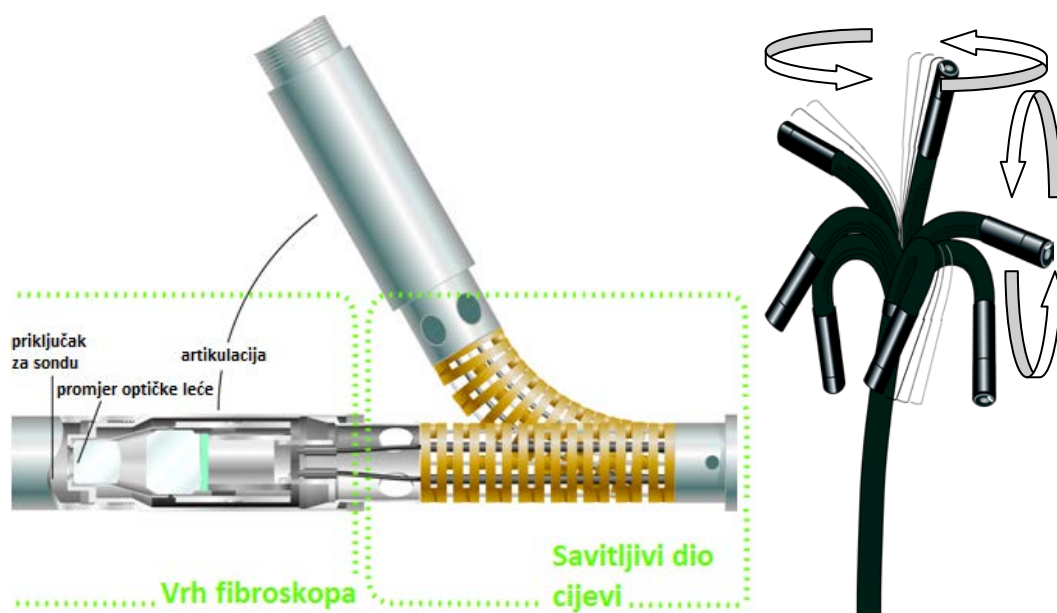


Slika 9. Princip prijenosa svjetlosti kroz optičko vlakno

Kako fibroskopi istovremeno daju sliku i osvijetljuju ispitnu površinu, moraju imati dva odvojena snopa vlakana. Jedan snop provodi emitiranu svjetlost izvora, dok drugi snop, kroz kameru na vrhu cijevi fibroskopa, prijenosi reflektiranu svjetlost ispitne površine i daje sliku. Vlakna koja prenose svjetlost obično su promjera oko 30  $\mu\text{m}$ , dok su vlakna koja prenose sliku od 9  $\mu\text{m}$  do 17  $\mu\text{m}$  [1]. Na slici 10 se vidi presjek fleksibilne cijevi fibroskopa korištenog u vizualnom ispitivanju (poglavlje 4).



Slika 10. Fleksibilna cijev fibroskopa XLTM40 PRO Plus



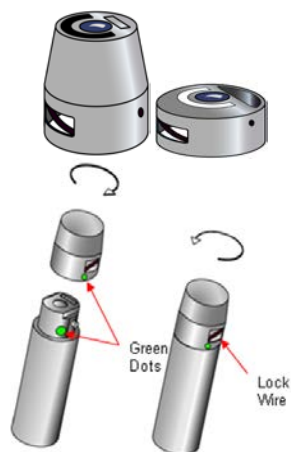
Slika 11. Upravljivi vrh fibroskopa sa zakretom od 360 stupnjeva i presjek

## Sonde fibroskopa

Kamera fibroskopa snima ispitnu površinu osvijetljenu preko snopova optičkih vlakna. Kako bi slika bila u fokusu, koristimo različite sonde ovisno o udaljenosti sonde od ispitne površine. Bitne karakteristike sonde, prikazane u tablici 2, su kut vidnog polja, dubina vidnog polja i povećanje.

TIP VIEW	TIP COLOR	FIELD OF VIEW	DEPTH OF FIELD	MAGNIFICATION on 13" Monitor 5" LCD	3.9 mm PROBE TIP PART #	5.0 mm PROBE TIP PART #	6.1 mm PROBE TIP PART #	7.3 mm PROBE TIP PART #	8.4 mm PROBE TIP PART #
<b>Forward Viewing Tip Optics</b>									
FORWARD	NONE	80°	6 mm - 80 mm (0.24 - 3.15 in)	37X / 15X	PXT480FG				
FORWARD	NONE	50°	50 mm (1.96 in) to infinity	10X / 4X		PXT550FF	PXT650FF	PXT750FF	XT850FF
FORWARD	WHITE	50°	12 mm - 200 mm (0.47 - 7.87 in)	30X / 11X		PXT550FG	PXT650FG	PXT750FG	PXT850FG
FORWARD	ORANGE	80°	3 mm - 20 mm (0.12 - 0.79 in)	70X / 27X		PXT580FN	PXT680FN		
FORWARD	YELLOW	90°	20 mm - (0.79 in) to infinity	12X / 5X			PXT690FF		
FORWARD	BLACK	100°	5 mm - 120 mm (0.20 - 4.72 in)	45X / 17X		PXT5100FG	PXT6100FG	PXT7100FG	PXT8100FG
<b>Side Viewing Tip Optics</b>									
SIDE	BROWN	80°	4 mm - 80 mm (0.16 - 3.15 in)	37X / 15X	PXT480SG				
SIDE	BROWN	50°	45 mm (1.77 in) to infinity	10X / 4X			XT650SF	PXT750SF	XT850SF
SIDE	GREEN	50°	9 mm - 160 mm (0.35 - 6.29 in)	30X / 11X		PXT550SG	PXT650SG	PXT750SG	PXT850SG
SIDE	RED	80°	1 mm - 20 mm (0.04 - 0.79 in)	70X / 27X		PXT580SN	PXT680SN	PXT780SN	PXT880SN
SIDE	BLUE	100°	4 mm - 100 mm (0.16 - 3.94 in)	30X / 11X		PXT5100SG	PXT6100SG	PXT7100SG	PXT8100SG
<b>ShadowProbe Measurement Tip Optics</b>									
FORWARD	WHITE	50°	12 mm - 30 mm (0.47 - 1.18 in)	30X / 11X			XTM650FG	PXTM750FG	
SIDE	GREEN	50°	12 mm - 35 mm (0.47 - 1.4 in)	30X / 11X			XTM650SG	PXTM750SG	
SIDE	BLUE	50°	7 mm - 24 mm (0.3 - 0.9 in)	50X / 19X			XTM650SN	PXTM750SN	
<b>StereoProbe Measurement Tip Optics</b>									
FORWARD	BLACK	50°/50°	5 mm - 45 mm (0.20 - 1.77 in)	44X / 14X	PXTM45050FG				
SIDE	BLUE	50°/50°	4 mm - 45 mm (0.16 - 1.77 in)	44X / 14X	PXTM45050SG				
FORWARD	BLACK	60°/60°	4 mm - 80 mm (0.16 - 3.15 in)	37X / 15X		PXTM56060FG	PXTM66060FG	PXTM76060FG	
SIDE	BLUE	50°/50°	2 mm - 50 mm (0.08 - 1.96 in)	45X / 17X			PXTM65050SG	PXTM75050SG	
SIDE	BLUE	45°/45°	2 mm - 50 mm (0.08 - 1.96 in)	45X / 17X		PXTM54545SG			
<b>Special Purpose Tip Optic</b>									
FORE-OBLIQUE	PURPLE	50°	5 mm - 45 mm (0.20 - 3.15 in)	44X / 14X			PXT650FB		

Tablica 2. Specifikacije sonde fibroskopa



Sonda korištena u ispitivanju u poglavlju 4.:

- vrsta: **PXT650FF**
- kut pogleda: 0° (prema naprijed, *forward*)
- vidno polje: 50°
- dubina vidnog polja: 50 mm - beskonačno
- promjer: 6.1 mm

Montiranje sonde:

- u ravninu postaviti zelene oznake na sondi i vrhu fibroskopa
- pritisnuti sondu i zarotirati u smjeru kazaljke na satu dok se ne zaključa sigurnosnom žicom (*lock wire*)

Slika 12. Sonda PXT650FF

## Izvor svjetlosti

Standardni projektor (izvor svjetlosti) s ugrađenom žaruljom, radi na dvije različite nominalne snage. Projektor od 150 W, koristi se za ispitivanje objekta blizu sonde. Druga snaga projektor od 1000 W, koristi se tijekom fotografiranja i vizualnog ispitivanja komora izgaranja i mlaznica visokotlačne turbine, gdje je udaljenost između sonde i ispitivane površine veća (u slučaju boroskopa). [2]

Projektor fibroskopa korišten u ovom radu ima ugrađenu *metal-halid* žarulju snage 50 W. Učinkovitost ovih žarulja je u rasponu od 56 lm/W do 115 lm/W, i proizvode intenzivno bijelo svjetlo. Velika prednost ovih žarulja u odnosu na druge vrste (xenon i halogen), je veća efikasnost u prijenosu svjetla u tanka optička vlakna fibroskopa. Efikasnost metal-halid žarulja je dvostruko veća od xenonskih i do 5 puta od halogenih žarulja. Mala snaga žarulje znači i manje proizvedene topline tijekom rada, manji sustav hlađenja i manje dimenzije projektor [5], [7].

## Održavanje opreme

Samo ispravna oprema daje dobre rezultate ispitivanja. Stoga je bitno konstantno pregledavati opremu i analizirati njenu ispravnost. Savijanjem i trošenjem optičkih vlakna, smanjuje se dostupni intenzitet svjetlosti. Sonde, a i ostala oprema, transportiraju se do mjesta ispitivanja posebnim prijenosnim kutijama u kojima su obložene absorbirajućim materijalom, te su tako zaštićene od udaraca. Na životni vijek sonde najviše utječu visoke temperature koje se često prisutne tijekom ispitivanja. Temperature već od 60 °C mogu oštetiti površinu leće u sondi [1].

## Rukovanje opremom

Tijekom ispitivanja fibroskopom, treba obratiti pozornost gdje i kako se vrši ispitivanje u motoru. Kada cijev fibroskopa prolazi kroz više stupnjeva rotora i statora, prilikom okretanja rotora u ispitivanju, može doći do prekidanja fleksibilne cijevi fibroskopa. Isto tako, u slučaju umetanja sonde i cijevi kroz oštre otvore, bitno je zaštititi opremu plastičnim vodilicama, koje spriječavaju dodir instrumenta i oštrog ruba.

## 2. 3. Radne upute kod ispitivanja

Vizualno se ispitivanje, kao i sve ostale akcije u održavanju, mora pridržavati određenih *regulativa, radnih uputa i normi* zrakoplovnih priručnika (AMM – *Aircraft Maintenance Manual*, NDTM – *Nondestructive Testing Manual*) [2]. Ispitivanje se provodi tijekom proizvodnje proizvoda, a pogotovo kasnije, u eksploataciji proizvoda, gdje se mora paziti na poštivanje propisanih uvjeta iz priručnika (osvijetljenost, čistoća i temperatura ispitne površine). Komponenta ne mora biti savršena da bi bila prihvaćena za naknadno korištenje. Nepravilnosti na komponenti koje su u dopuštenim granicama moraju biti dokumentirane, a takva komponenta s greškom se smatra prihvatljivom. U slučaju pojave nepravilnosti blizu granične vrijednosti, može se produžiti granica upotrebljivosti na neki propisani interval određen skupljenim iskustvom tijekom godina eksploatacije. Radne upute i norme, dakle, propisuju *tko, kada, gdje i kako* provodi ispitivanje, te propisuju granice prihvatljivosti i upotrebljivosti za određeni ispitani dio.

### Informacije potrebne za provođenje ispitivanja

Prije početka ispitivanja, osobi koja vrši ispitivanje, treba biti omogućen pristup pisanoj dokumentaciji, radnim uputama i normama vezanim za ispitivanje koje će provesti. One će mu olakšati i ubrzati rad. Dokumentacija sadržava mnoge informacije, kao što su kriterij prihvatljivosti, stanje i priprema površine, potrebna oprema, kalibracije i pregled opreme, zahtjevi osvjetljenja, sigurnost, itd.

### Kriterij prihvatljivosti

Osnovni parametri koje se uzima u obzir tijekom karakterizacije uočene nepravilnosti sadrže informacije o veličini, mjestu, poziciji, orijentaciji i učestalosti nepravilnosti. Ispitani dijelovi se dijele na nepravilne dijelove i ispravne dijelove. Nakon grupacije, nepravilni dijelovi se dalje razmatraju jesu li za otpad ili popravak. U zrakoplovstvu svaki proizvođač ima vlastite kriterije prihvatljivosti nekog proizvoda ili sustava, jer se većina kriterija bazira na iskustvu. U ocjenjivanju rezultata provedenog ispitivanja, također je bitno i iskustvo ispitivača. Moguća je pojava lažne indikacije koja se s iskustvom može razlikovati od stvarne indikacije.

### Dokumentacija i izvještaj provedenog ispitivanja

Detalji koji trebaju biti u izvještaju vizualnog ispitivanja su:

1. Uvjeti (osvijetljenje, metode čišćenja i odstranjivanja prljavštine s površine, priprema površine, temperatura, itd...)
2. Oprema (lista korištene opreme, s detaljima o tipu opreme, identifikacijskim brojevima...).
3. Identifikacija ispitivanog dijela.
4. Identifikacija provedenog ispitivanja, tj. broj ispitivanja.
5. Datum kad je izvršeno ispitivanje.
6. Podaci o ispitivaču.
7. Specifikacije ispitivanja.
8. Upute.

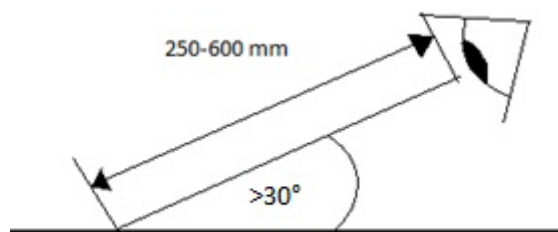
9. Rezultati ispitivanja (tip pronađene nepravilnosti, njene dimenzije, lokacija, i neobična zapažanja).
10. Snimljene slike i filmovi tijekom ispitivanja.
11. Zaključak o prihvatljivosti ispitnog dijela, dodatni komentari (o dodatnim popravcima, produženju granice upotrebljivosti i drugim postupcima...)

### Uvjeti ispitivanja

Okruženje unutar kojeg se izvodi vizualno ispitivanje mora zadovoljiti neke bitne uvjete vezane za čistoću predmeta/površine, osvjetljenja, pristupa i udaljenosti na kojoj se izvršava kontrola, te sigurnosti ispitivača.

Prilikom ispitivanja velika pozornost se daje osvjetljenju. Refleksija i sjene okoline (zidova, prozora, stropa, poda...) utječu na kvalitetu ispitivanja, u konačnici i na sami rezultat vizualne kontrole. Područje ispitivanja mora biti dostatno osvjetljeno. Ljudsko oko najučinkovitije zapaža na dnevnom svjetlu. Za vizualno je ispitivanje vrlo bitna jačina osvjetljenja i odgovarajuća rasvjeta. Za minimalne granice osvjetljenosti uzima se vrijednost od 160 lx za opći pregled, dok je za detaljnije preglede minimalno osvjetljenje 500 lx [1].

Ako se tijekom ispitivanja ne koriste optička sredstva, promatranja se uglavnom provode na udaljenosti između 250 mm i 600 mm, i to pod kutem ne manjim od  $30^\circ$  u odnosu na površinu ispitnog objekta [1].



Slika 13. Preporučena pozicija oka kod direktnog ispitivanja

Ispitivanje se mora provoditi u sigurnoj okolini. Ima puno faktora sigurnosti koje treba uzeti u obzir, ali posebno se obraća pozornost na rukovanje otapala za čišćenje i pažljivo korištenje različitih izvora svjetlosti. Otapala za čišćenje površina lako su zapaljiva, a neka i toksična, dok izvori svjetlosti lošim rukovanjem i dugotrajnim izlaganjem mogu štetno djelovati na zdravlje ispitivača. Svjetlo jakog intenziteta može oštetiti mrežnicu oka, UV svjetlo uzrokuje mrene na oku, crvenilo na koži, glavobolje, umor, itd. Korištenje zaštitne opreme sprječava štetno djelovanje izvora svjetlosti. Umor i stres ispitivača su isto dva bitna faktora, koji mogu utjecati na kvalitetu ispitivanja.

### Izvori svjetlosti

Sunčeva svjetlost ljudskom oku daje optimalnu distribuciju valnih duljina. Dokazano je da Sunčeva svjetlost tijekom oblačnog dana daje puno bolje rezultate ispitivanja nego Sunčeva svjetlost za vrijeme vedrog dana, kod kojeg je često dolazi do odsjaja svjetlosti od površine ispitivanog objekta i tako smanjuje sposobnost ispitivača da uoči nepravilnosti [1]. Zato se koriste razni filtri koji proizvode

svjetlo određene valne duljine, tj. *monokromatsko svjetlo*. Takvo svjetlo je manje blještavo i povoljnije je za ispitivanje.

U zatvorenim i mračnim prostorima, koriste se umjetni izvori svjetla, kao što su obične žarulje, ručne lampe, stolne lampe, fluorescentne lampe, žarulje s natrijevom i živinom parom, stroboskopski izvori svjetla, te UV i halogene žarulje [1].

Izvor	Udaljenost od površine
Žarulja (metal-halid) <sup>3</sup> , 50 W	200 mm
Žarulja (volfram), 60 W	250 mm
Žarulja (volfram), 75 W	380 mm
Žarulja (volfram), 100 W	460 mm

Tablica 3. Udaljenosti izvora od površine osvijetljene sa 500 lx

### Čistoća površine i metode čišćenja

Čistoća je **osnovni zahtjev** za točno i precizno provođenje vizualne kontrole. Predmet koji se pregledava, **mora** biti čist. Bez prljavštine, prašine, masnoća, zaštitnih premaza i drugih slojeva čestica koje mogu utjecati na kvalitetu ispitivanja.

Prljava površina uzrokuje loše procjene stanja površine, i može prikriti nepravilnosti. Načini čišćenja moraju biti određeni ovisno o svojstvima ispitnog uzorka, zagađivačima ispitne površine, potrebnoj vještini i cijeni.

Postoje različite metode čišćenja i pripreme površine za ispitivanje. Neke od njih su: suho abrazivno gađanje (*Dry Abrasive Blasting*), mokro abrazivno gađanje (*Wet Abrasive Blasting*), četkanje, brušenje, struganje, čišćenje otapalima, itd. [1]

Nepravilnosti i deformacije teško je uočiti ako se ispituju grube, hrapave površine. Bitno je znati o kojem se materijalu površine radi i koliko će se detaljno ispitivati površina. Nepravilno odabranom metodom čišćenja, može se nepovratno oštetiti površinu i ispitivanje učiniti ne mogućim.

Hrapavost površine se definira preko vrhova i dolova mikroskopskih izbočina, te njihove gustoće na površini. Ovisno kojom se metodom čisti površina, stanje joj nakon obrade može biti glatko, grubo, polirano...

### Temperatura površine

Temperatura objekta kojeg se ispituje, uglavnom je na temperaturi gdje se vrši ispitivanje. Posebni slučaj su visoke ili niske temperature. Prilikom takvih uvjeta, bitno je zaštititi ruke ispitivača, i biti spreman na odstupanja opreme od kalibriranog mjerila zbog temperaturnih deformacija objekta kojeg se ispituje. Takvi primjeri su česti u zrakoplovstvu, jer se motori često ispituju nakon leta i potrebno je pričekati jedno vrijeme da temperature padnu na vrijednosti kod kojih neće doći do oštećenja opreme.

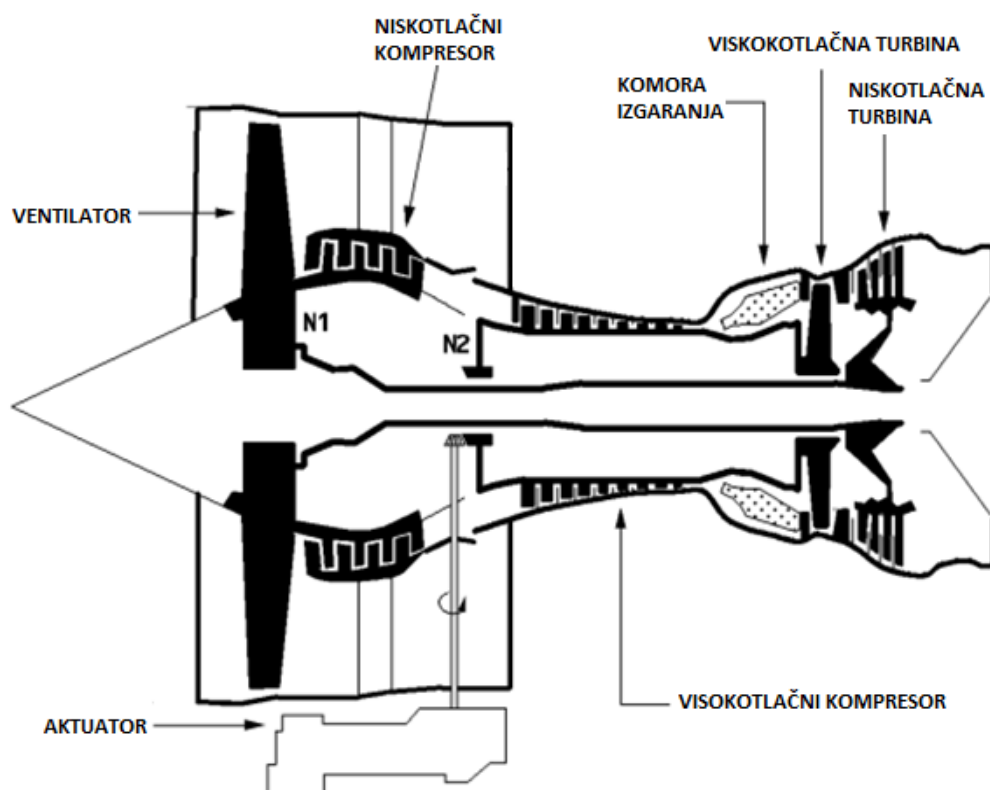
<sup>3</sup> Rezultati fotometrije opreme za ispitivanje (str. 30)



### 3. Boroskopija motora CFM56-5B

CFM56-5B je vrsta turboventilatorskog (*turbofan*) motora koji se nalaze na 7 zrakoplova tipa *Airbus* u floti tvrtke *Croatia Airlines*. CFM56-5B su dvoprotočni motori, a silu potiska ostvaruju tako što kroz mlaznice na stražnjem dijelu motora, ispuštaju vruće plinove izgaranja velikom brzinom. Ukupna struja zraka se prvo stlači pomoću prednjeg ventilatora (*fan*), nakon kojeg dio zraka ulazi u kompresor, a dio obilazeći jezgru motora, odlazi u atmosferu ili ulazi u prostor iza turbine miješajući se s ispušnim plinovima prije ulaska u mlaznice. Današnji turboventilatorski motori imaju nisku vrijednost specifičnog potiska (stvoreni potisak podijeljen ulaznim strujanjem zraka) što motor čini tišim i ekonomičnijim. Suprotno, *bypass* omjer (omjer između količine zraka koji obilazi jezgru motora s količinom zraka koja prolazi kroz jezgru motora) relativno je velik kod CFM56-5B iznosi do 6:1, što znači manja količina ispušnih plinova i manje zagađenje okolnog zraka [8].

Boroskopija je jedan od šest radnih zadataka *Condition Monitoringa* motora familije CFM56, i dio je planiranog linijskog održavanja. Planiranim vizualnim pregledima kritičnih komponenti na motoru, osigurava se njegova pouzdanost i efikasnost. Te kritične komponente su najčešće rotirajući dijelovi motora, sve vrste lopatica, komore izgaranja (slika 14).



Slika 14. Modularno projektirani motor, CFM56-5B

Nakon isteka propisanog perioda određene komponente (*Flight Hours* ili *Flight Cycles*) u MPD-u (*Maintenance Planning Document*), ispituju se komora izgaranja, ventilator, lopatice rotora i statora niskotlačnog kompresora i turbine te lopatice rotora i statora visokotlačnog kompresora i turbine. U slučaju iznenadnog otkazivanja ili greške, provode se posebna ispitivanja na motoru. Priručnici za održavanje motora CFM56 (AMM, NDTM i EMM - *Engine Maintenance Manual*), daju niz potrebnih koraka prilikom ispitivanja kod specifičnih problema. Ovim priručnicima je također propisano korištenje određene opreme ovisno o vrsti ispitivanja. Bitno je da oprema pruža zadovoljavajuće



rezultate, odnosno da se uz dobro osvjetljenje projektora i dobru rezoluciju endoskopa, može pravilno analizirati stanje komponente. U nastavku ovog poglavlja su ukratko navedeni bitni koraci ispitivanja svih dijelova motora, a za detaljnije informacije o opremi i radnim uputama, treba pogledati u NDTM i AMM.

Nakon provedenog ispitivanja pojedinog dijela motora, savjetuje se zbog bolje organiziranosti, da svaki stupanj rotora i statora, ima svoju kartu za dokumentacije. U karte se zapisuju uočene nepravilnosti na lopaticama. Također se pridružuje i slikovni prikaz oštećenja. Lopatice se mogu numerirati na svakom stupnju rotora, kada je on u referentnoj poziciji. Slikovnim se prikazom lako prati napredovanje oštećenja između planiranih pregleda. Kada oštećenja prijeđu granice upotrebljivosti, određene lopatice se zamjenjuju. Dokumentacija o oštećenju lopatica ostaje u karti održavanja motora dok se ne zamijene ili poprave.

### 3. 1. Otvori za boroskop

Otvori na motoru služe za brži, kraći i jednostavniji pristup komponenti koja se treba ispitati. Kod vizualnog ispitivanja motora, za osobu koja provodi ispitivanje bitno je poznavati konstrukciju motora i standardizirane pozicije otvora za boroskop. Pozicije tih otvora su u priručnicima detaljno opisane i skicirane, i služe kao podsjetnik. U svakom slučaju, prikladno je unaprijed znati pozicije otvora. Na motoru CFM56-5B postoji 22 otvora za boroskopiju.

Niskotlačni kopresor ima samo 2 otvora za ispitivanje. Između 3. i 4. stupnja, te iza 5. stupnja rotora.

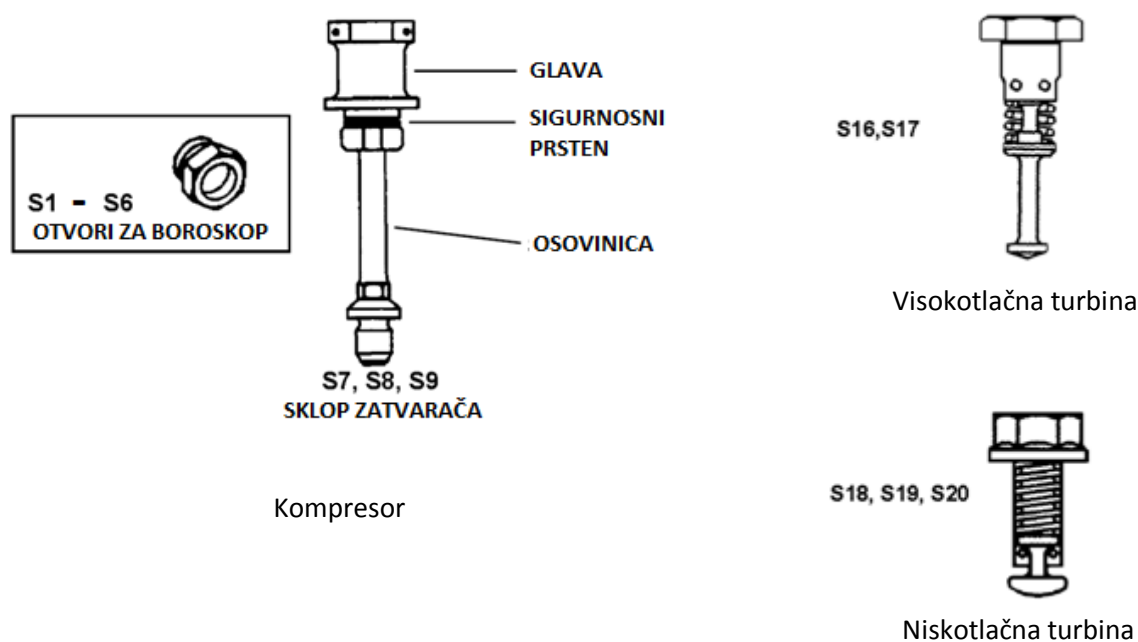
Visokotlačni kompresor ima po jedan otvor u svakom stupnju statora (ukupno 9).

Za ispitivanje komore izgaranja, postoji ukupno 6 otvora, od kojih su 2 otvori za svijećice.

Visokotlačna turbina ima 2 otvora za ispitivanje izlazne ivice lopatica turbine, dok se ulazne ivice lopatica turbine ispituju fibroskopom kroz 2 otvora za svijećice u komori izgaranja.

Niskotlačna turbina ima po jedan otvor svakom stupnju statora (ukupno 3).

Kod planiranih pregleda se ne ispituje stalno kroz sve otvore. Ovisno o veličini pregleda, propisuju se otvori kroz koje je nužno izvršiti ispitivanje unutrašnjosti motora. U većini pregleda koriste se najviše 7 otvora. Ostali otvori se koriste tijekom opširnijih pregleda u baznom održavanju ili kod neplaniranog kvara motora.



Slika 15. Skica zatvarača na kompresorskom i turbinskom dijelu motora

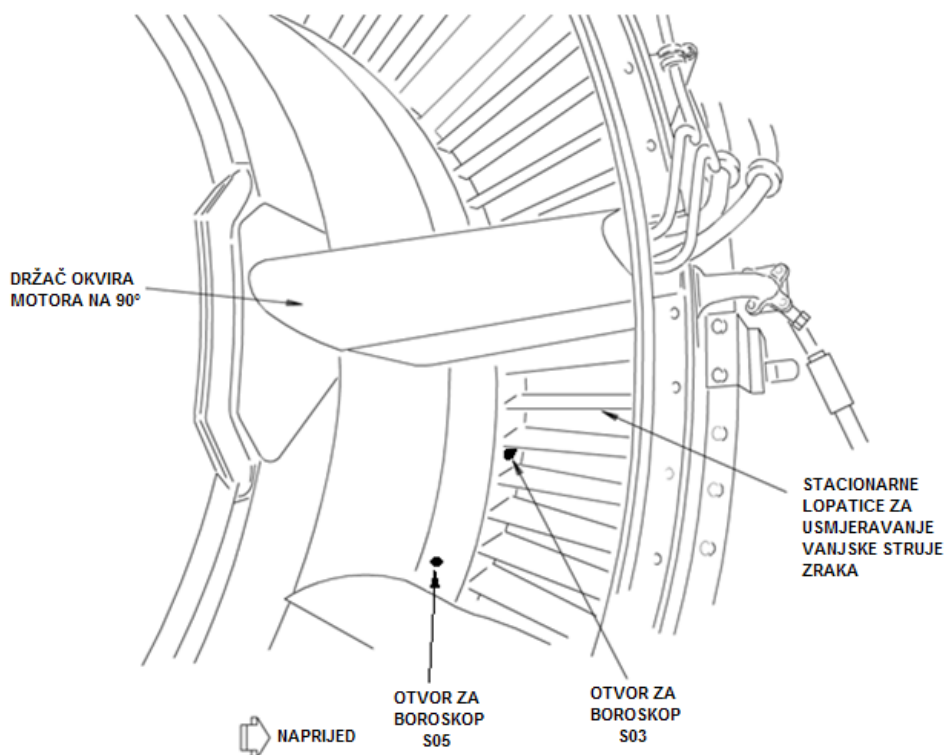
Zatvarači u visokotlačnom dijelu motora osigurani su od odvijanja i ispadanja, sigurnosnim prstenom (*Retaining Ring*) i oprugom. U slučaju da je otvor iznutra djelomično zatvoren s lopaticom rotora, potrebno je lopaticu pomaknuti pomoću tankog štapa, te tako omogućiti ulaz sonde endoskopa.

Otvori su različitih promjera, što daje ispitivaču, kada je to potrebno, mogućnost odabira sonde s većim povećanjem slike. Otvori u kompresoru su po standardu promjera 8 mm ili 10 mm [2].

### 3. 2. Definicije stanja površine

Kod uočavanja nepravilnosti tijekom ispitivanja, važno je precizno odrediti koje je vrste određena nepravilnost. Odnosno, poznavanjem specifičnih indikacija, može se lako zaključiti koji je uzrok njihove pojave, te se tako otkriva kvar u motoru u ranoj fazi. Postoje različita stanja površine, koja su detaljnije opisana i prikazana u dodacima (Tablica 2 u dodatku) [2].

### 3. 3. Boroskopsko ispitivanje ventilatora i niskotlačnog kompresora



Slika 16. Otvor za boroskop u dijelu ventilatora i niskotlačnog kompresora

#### Radne upute ispitivanja

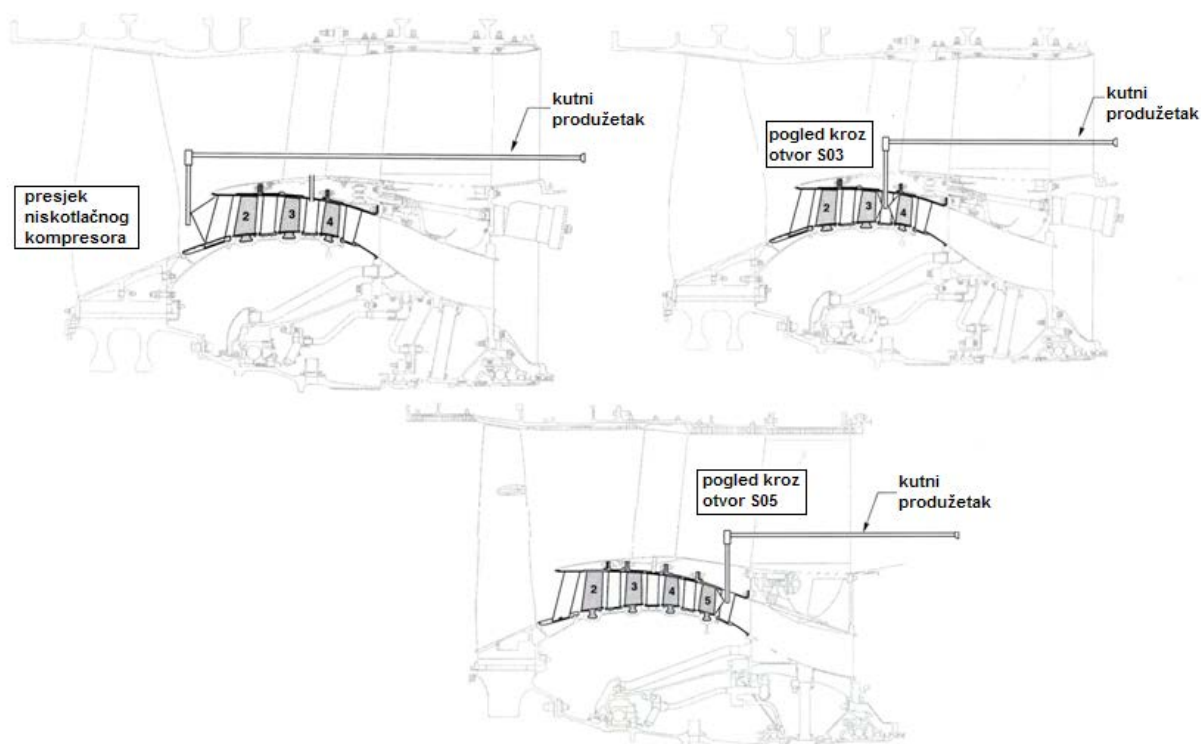
Cijelo ispitivanje ovog dijela motora se sastoji od dva načina ispitivanja.

Prvi način je opće vizualno, bez pomoći boroskopa. Ovako je moguće pregledati samo pola napadne ivice drugog stupnja niskotlačnog kompresora, uz pomoć ručne svjetiljke. Drugi način je detaljniji pregled, korištenjem boroskopa s desnokutnim nastavkom.

Postoje dvije pozicije za boroskop, kao na slici 17.

Ispitivanje se vrši tako da se u otvor između trećeg i četvrtog stupnja rotora, umetne kruti boroskop sa sondom 2. Rotor se zatim ručno okreće, okretanjem ventilatora. Ili se sonda jednostavno postavi iza ventilatora. Tako se ispituje drugi stupanj niskotlačnog kompresora. Kod ove vrste ispitivanja, problem može predstavljati označavanje i prepoznavanje lopatica. Ventilator ima 36, dok svaki stupanj niskotlačnog kompresora ima 76 lopatica.

Referentna, nulta pozicija, niskotlačnog kompresora se vrlo brzo pronađe. Stupnjevi lopatice niskotlačnog kompresora su u nultoj poziciji, kada su senzor temperature na okviru ventilatora i označena prva lopatica ventilatora, poravnati. U ovoj se poziciji rotora, izvodi brojanje i označavanje lopatica. Ovakva numeracija lopatica, olakšava orijentaciju i dokumentiranje uočene nepravilnosti.



Slika 17. Pozicije boroskopa prilikom ispitivanja niskotlačnog kompresora

## Kriteriji ispitivanja

Kada se provodi ispitivanje lopatica ventilatora i niskotlačnog kompresora, mora se obratiti pozornost na postojanje sljedećih nepravilnosti, te spadaju li u granice upotrebljivosti koje propisuje AMM:

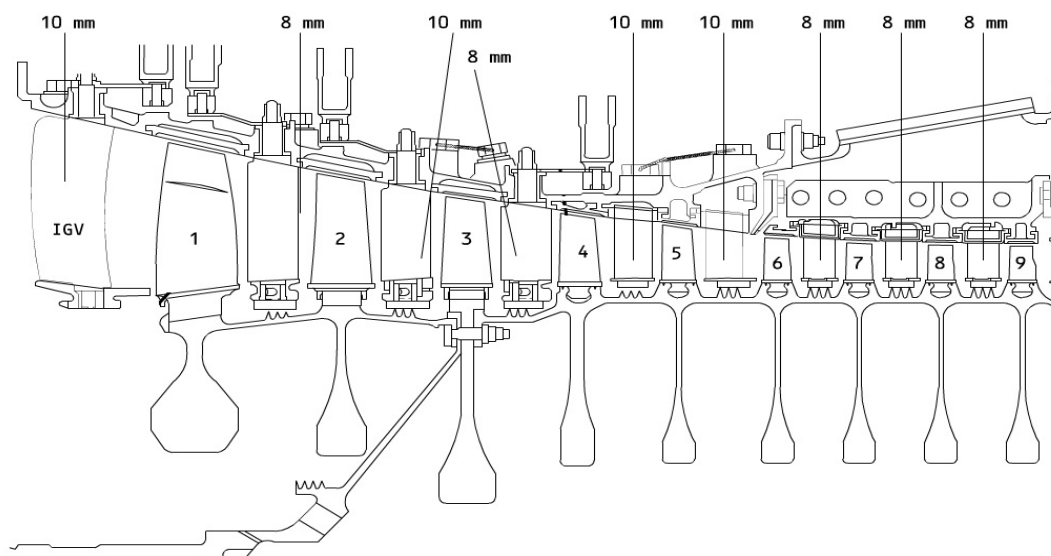
- Pukotine ili naznake habanja
- Zarez i urezotine
- Udubljenja
- Erozijske
- Zakrivljenost vrhova lopatica
- Brazdice
- Distorzije ivica
- Nedostajanje metala na lopaticama

Dodatni pregledi se vrše prilikom:

- Zatajivanja ventilatora
- Oštećenja kod udarca stranog tijela (pogotovo udar ptice)
- Velikih vibracija ventilatora

### 3. 4. Boroskopsko ispitivanje visokotlačnog kompresora

U visokotlačnom kompresoru postoje devet (9) otvora za boroskop. Nalaze se na statoru, i dopuštaju pregled lopatica svih stupnjeva u kompresoru.



Slika 18. Otvori visokotlačnog kompresora

#### Radne upute ispitivanja

Kod ispitivanja, rotor kompresora se mora okretati kako bi se pregledale sve lopatice u ispitivanom stupnju. Okretanje rotora se postiže aktuatorom koji se priključuje na pomoćni reduktor (*Accessory Gearbox*, AGB).

Ispitivanje se provodi kroz devet otvora na statoru. Kroz otvore se pregledavaju izlazne ivice prethodnog i napadne ivice sljedećeg stupnja rotora. Kod prva tri stupnja (1., 2., 3.) rotora visokotlačnog kompresora, potrebno je okretati rotor više od jednog kruga (360°). Lopatice prvih stupnjeva kompresora su većih površina, pa se zbog sigurnosti da se uoče sve nepravilnosti, preporučuje više rotacija rotora.

Kod planiranog pregleda ispituje se cijeli 3. stupanj kroz 3. i 4. otvor statora, te izlazne ivice 8. i napadne ivice 9. stupnja, kroz 9. otvor.

Ispitivanja ostalih lopatica se provode kod specijalnih slučajeva i ne planiranih pregleda.

Gdje je potrebno, skidaju se varijabilne lopatice statora (VSV) za lakši pristup boroskopom (prva četiri otvora S1, S2, S3, S4).

U slučaju pronalaska nepravilnosti, rotor se treba namijestiti u nultu poziciju, zbog dokumentiranja nađene nepravilnosti. Nultu poziciju se dobije poravnavanjem napadne ivice prve lopatice četvrtog stupnja rotora i napadne ivice četvrtog stupnja statora. Lopatica rotora broj 1, slijedi odmah nakon druge osiguravajuće pločice na četvrtom stupnju rotora.

Kod ispitivanja stupnjeva visokotlačnog kompresora, važno je na licu mjesta, snimiti ili slikati nepravilnosti, kako ne bi kasnije, tijekom popravka, došlo do zabune.

### Kriteriji ispitivanja

Tijekom ispitivanja obratiti pozornost na sljedeće nepravilnosti, i procijeniti naknadne korake sukladno propisanim granicama upotrebljivosti:

- Pukotine
- Zarezi
- Urezotine
- Udubljenja
- Erozije
- Zakrivljenost vrhova lopatica
- Brazdice
- Distorzije ivica
- Nedostajanje metala na lopaticama
- Prljavština

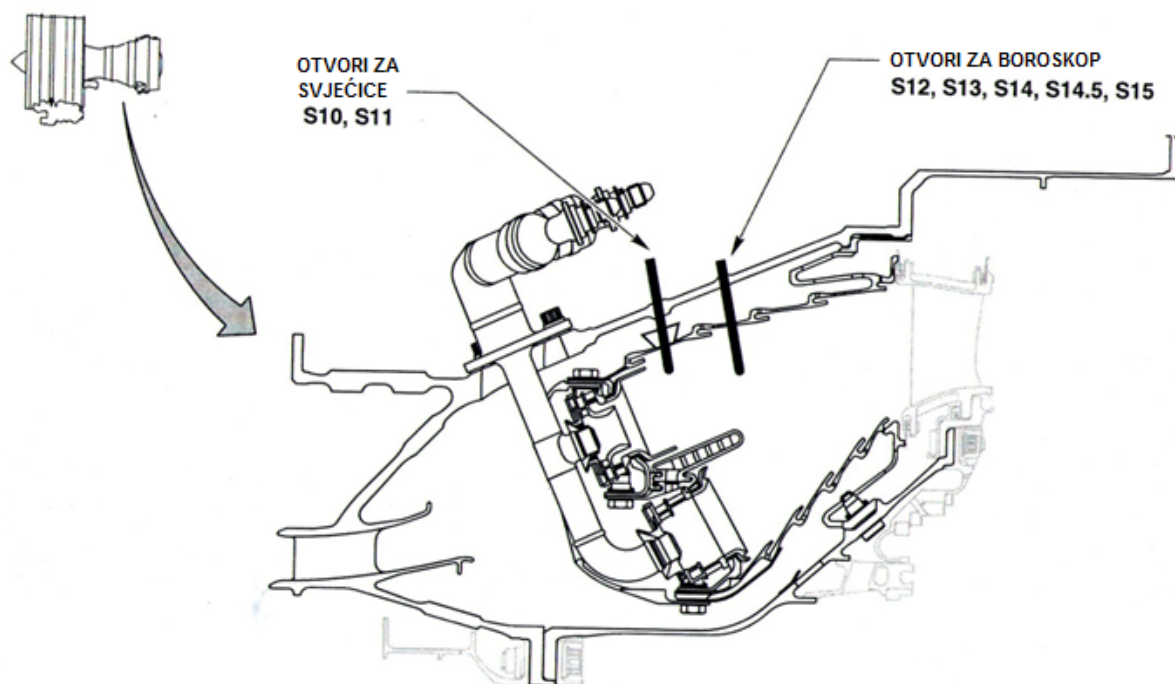
Dodatni pregledi se vrše prilikom:

- Zatajivanja rotora visokotlačnog kompresora
- Pojave dima ulja u kabini
- Udarca stranog tijela
- Visokih vibracija rotora visokotlačnog kompresora

### 3. 5. Boroskopsko ispitivanje komore izgaranja

U dijelu komore izgaranja postoji 6 otvora za boroskop. 4 su otvora predviđena za boroskop, dok su ostala dva otvora za svjećice. Skidanjem svjećica, otvori se mogu koristiti i za ulaz sonde boroskopa.

U dijelu komore izgaranja ispituju se područja blizu onog otvora u kojem je boroskop. Komora predstavlja veliku ispitnu površinu, i upravo je zbog toga projektirana s većim brojem otvora. Gledaju se dijelovi kupola, vrhovi sapnica goriva, unutarnja i vanjska podstava.



Slika 19. Komora izgaranja

## Radne upute ispitivanja

Ispitivanje počinje umetanjem sonde boroskopa u bilo koji otvor na komori.

Korištenje sonde 2 (slika 7) je preporučeno za općeniti pregled komore, pogotovo područje kupole (*dome*). Sonda 3 (slika 7) se preporuča u kružno ispitivanje komore izgaranja i unutarnje podstave blizu otvora. Vanjsku podstavu se ispituje sondom 4. Sondu 1 (slika 7) s velikim povećanjem dobro je koristiti u pregledu unutarnjih i vanjskih podstava stražnjeg dijela komore. Korištenjem fibroskopa u svrhu ispitivanja komore izgaranja, izbjegava se izmjena sonde na boroskopu kod ispitivanja dijelova komore izgaranja. Fibroskopom se tako, uz veću osvijetljenost, može brže ispitati cijela komora izgaranja.

## Kriteriji ispitivanja

Tijekom ispitivanja komore izgaranja obratiti pozornost na sljedeće nepravilnosti, i procijeniti naknadne korake sukladno propisanim granicama upotrebljivosti.

Nepravilnosti:

- Promjena boje materijala tijekom eksploatacije:
  - Ispitivanje se provodi bijelim svjetlom visokog intenziteta, zbog većeg prostora, tj. udaljenosti vrha boroskopa od unutarnje površine komore.
- Deformacija i pucanje:
  - Stražnja ploča unutarnje podstave sklona je deformacijama i pucanju. Prve indikacije su promijene boje u obliku malih krugova, zatim slijede deformacije i pucanja materijala.

Ovaj tip indikacija se uglavnom pojavljuje u jednakim kružnim intervalima na unutanjoj podstavi, otprilike na 20-tak mjesta [2].

Posebni pregledi kod:

- Nadprosiječne temperature ispuha, tijekom polijetanja i horizontalnog leta
- Udarnog oštećenja na lopaticama visokotlačne turbine

### 3. 6. Boroskopsko ispitivanje mlaznica (lopatica statora) visokotlačne turbine

#### Radne upute ispitivanja

Obično se kod ispitivanja komore izgaranja, istovremeno provodi i pregled mlaznica visokotlačne turbine. Ovaj pregled isto spada unutar planiranog održavanja. Koriste se otvori na komori izgaranja. Istih 6 otvora, kao kod ispitivanja komore.

#### Kriteriji ispitivanja

Tijekom ispitivanja mlaznica obratiti pozornost na sljedeće nepravilnosti, i procijeniti naknadne korake sukladno propisanim granicama upotrebljivosti:

- |                                       |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| • Promjena boje                       | • Izlazna ivica aeroprofila     |
| • Oštećenja na napadnim ivicama       | - Pukotine                      |
| - Pukotine                            | - Izvijanje, svijanje           |
| - Sagorena površina                   | - Sagorena površina             |
| - Blokirani prolazi zraka za hlađenje | • Druga područja aeroprofila    |
| • Konkavna površina aeroprofila       | - Sagorena površina             |
| - Pukotine                            | - Zarezi i urezotine, udubljena |
| • Konveksna površina aeroprofila      | • Unutarnji i vanjski obruč     |
| - Pukotine                            | - Sagorena površina             |
|                                       | - Pukotine                      |

Posebna ispitivanja se provode prilikom:

- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| • Porasta temperature u mlaznici | • Porasta temperature ispuha |
| • Zatajivanja motora             |                              |



### 3. 7. Boroskopsko ispitivanje niskotlačne turbine

#### Radne upute ispitivanja

Za ispitivanje lopatica u niskotlačnoj turbini, postoji ukupno 3 otvora (S18, S19, S20) za boroskop.

Ispitivanje može biti izvršeno krutim boroskopom. Širokokutna sonda 2 (slika 7) je pogodna za sva ispitivanja na lopaticama. Sonde 3 i 4 se koriste kada je potrebna detaljnija procijena stanja vrhova i platformi lopatica turbine. Zadnji, četvrti stupanj niskotlačne turbine može se ispitati kroz sustav ispuha motora.

Rotacija turbine se postiže ručno, preko ventilatora. Kod ispitivanja napadnih ivica, konkavne strane lopatica moraju se kretati prema leći boroskopa, a ne odlaziti od nje. Obrnuta je situacija kod ispitivanja izlaznih ivica. Ovdje konveksne strane lopatica prilaze leći, kako se rotor okreće.

Kod ispitivanja vrhova lopatica, treba obratiti pozornost na vrh lopatica, odnosno spoj lopatica i vršnih pokrova (*tip shroud*). Za bolje rezultate ispitivanja aeroprofila lopatica, ručno okretanje rotora mora biti ravnomjerno, bez naglih pomaka. Zbog veće duljine lopatica zadnjih stupnjeva, sonda se mora pomicati duž cijele površine, a rotor je potrebno okretati više od 360°, kako bi se sa sigurnošću pregledala cijela površina.

#### Kriteriji ispitivanja

Kada se kod planiranog pregleda provodi ispitivanje lopatica niskotlačne turbine, mora se obratiti pozornost na postojanje sljedećih nepravilnosti, te spadaju li u propisane granice upotrebljivosti:

- Pukotine
  - Moguće je zamijeniti pukotine s mrljama ili crtkanim nakupinama izgorjenog ugljika. U tom slučaju potrebno je na boroskop spojiti dodatno povećalo.
- Zarezi i udubljenja
- Potrošenost/Habanje
  - Najčešće su to vrhovi lopatica
- Nakupljanje prljavštine, promijene boje, pitting i korozija
  - Kod ovih pojava na lopaticama, teško se dolazi do egzaktne procijene, jer su njihove pojave vrlo slične. Potrebno je koristiti sve tri sonde (2, 3, i 4).

Posebna ispitivanja niskotlačne turbine provode se kod pojave prekomjernih temperatura (ispituju se samo prvi i četvrti stupanj), i komadića stranog tijela (ispituju se svi stupnjevi).

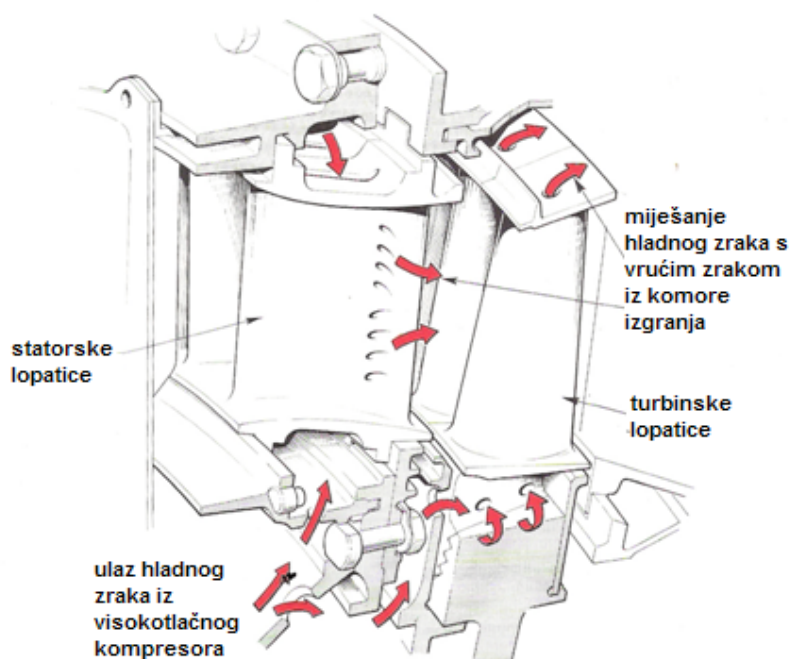
#### 4. Vizualno ispitivanje komponente – lopatice visokotlačne turbine



Slika 20. Ispitivanje lopatica visokotlačne turbine i fibroskop

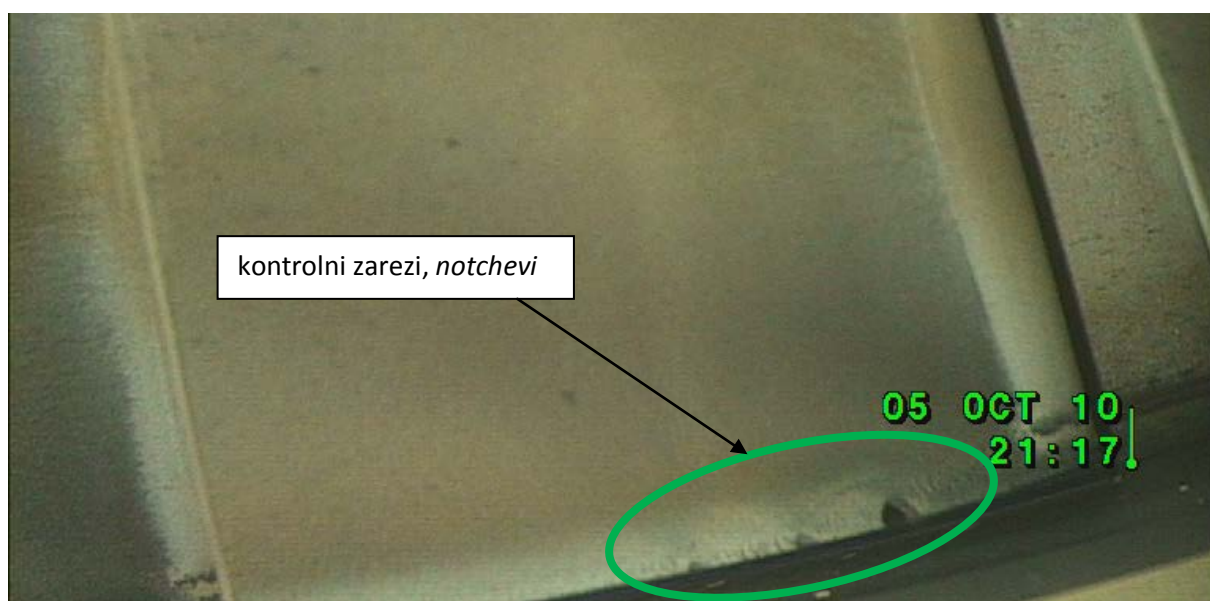
Visokotlačna turbina smještena je u stražnjem dijelu kućišta komore izgaranja. Sastoji se od jednog statorskog stupnja (mlaznica, *nozzles*) koji usmjerava vrući tok plinova iz komore izgaranja na lopatice rotora, i jednog stupnja rotora spojenog preko vratila s rotorom visokotlačnog kompresora (CFM56-5B).

Sustav hlađenja vanjske stijenke visokotlačne turbine, izveden je cjevovodima i ventilima (HPTCC *valve*) koji dovode hladni zrak iz četvrtog i devetog stupnja visokotlačnog kompresora. Hlađenje lopatica rotora, postignuto je strujanjem zraka iz visokotlačnog kompresora kroz korijen lopatica i male otvore na napadnoj i izlaznoj ivici, te vrhove lopatica.



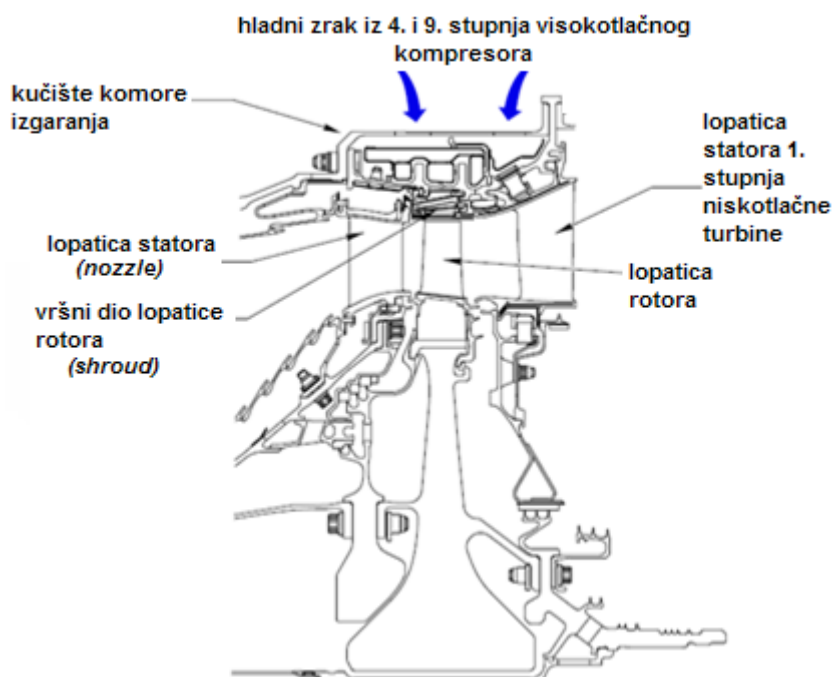
Slika 21. Skica sustava hlađenja visokotlačnog dijela turbine

Rotor sadrži 80 pojedinačno zamjenjivih lopatica. Izrađene su od superlegura na bazi nikla u kombinaciji s manjim postotkom kroma, kobalta, volframa, itd. Lopatice se često izrađuju usmjerenom kristalizacijom (*directionally solidified*), a rijetko monokristalima koji su skuplji, ali boljih svojstava (rad na višim temperaturama, veća čvrstoća...). Otporne su na visoke temperature, velike su čvrstoće i male mase. Četiri lopatice imaju konstrukcijske ureze na konveksnoj strani lopatice, koji predstavljaju referentne vrijednosti kada se procjenjuje stupanj potrošenosti vrhova lopatica. Dubine tih ureza su poznate i iznose 0,25 mm, 0,51 mm i 0,76 mm. Urezi ispitivaču pomažu u boroskopskom ispitivanju prilikom donošenja procjena veličina nepravilnosti/oštećenja na vrhovima lopatica i prilikom procjena gubitka efikasnosti motora uslijed povećanja razmaka između vrhova lopatica i unutarnje stijenke motora.



Slika 22. Kontrolni zarezi

Ispitivanje visokotlačne turbine, odnosno lopatica rotora, po AMM-u, dijeli se na dva zadatka (*taska*), 72-52-00-290-001 i 72-52-00-290-002, koji su detaljnije opisani na str 35.



Slika 23. Presjek visokotlačne turbine

## Oprema

Za ispitivanje napadnih ivica na lopaticama turbine, AMM savjetuje korištenje **fibroskopa**, dok se za ispitivanje izlaznih ivica treba koristiti **boroskop** i jedna od sonde 2, 3 ili 4. U ovom ispitivanju je korištena oprema koja je detaljnije opisana u 2. poglavlju (vidi *Fleksibilni endoskopi, fibroskopi*, str. 8).

Od dodatne opreme, za ispitivanje lopatica turbine, potrebno je imati i **cijev za pozicioniranje (cijev vodilja)**. Pomoću nje se sonda boroskopa usmjeruje kroz komoru izgaranja i stupanj mlaznica, na napadne ivice lopatica turbine. Zatim **kompresor zraka** (rijetko), koji se koristi u okretanju turbine i **ključevi** za skidanje zatvarača i svijećica. Za okretanje turbine u tvrtki *Croatia Airlines* se uglavnom koriste **aktuatorom** (Slika 42.) koji se može pogoniti elektronički ili ručno.



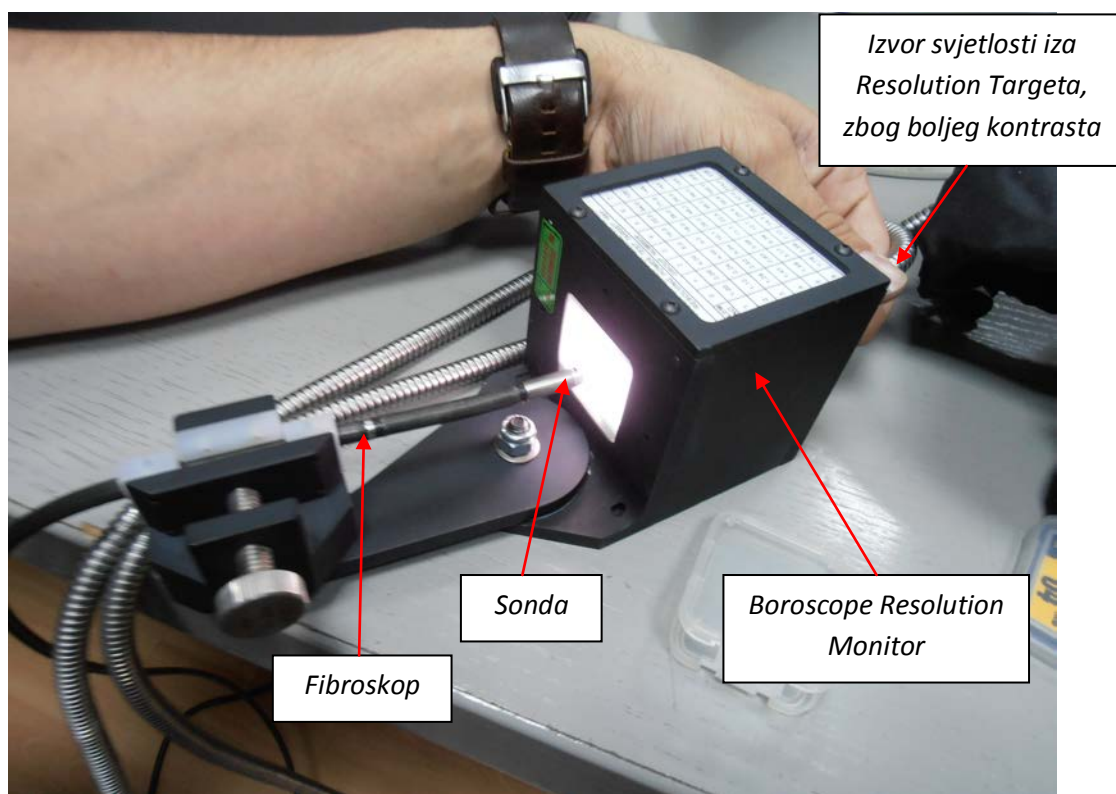


Plastična cijev za navođenje sonde fibroskopa (kroz komoru izgaranja do lopatica visokotlačne turbine)

Slika 24. Fibroskop/videoskop XLTM40 PRO Plus, komplet s cijevi za pozicioniranje sonde

### Kalibriranje - provjera rezolucije i osvijetljanja

U Priručniku za nerazorna ispitivanja (NDTM, Part 7, *Borescope Inspection*, točka 5. B.), opisana je metoda kalibracije endoskopa (boroskopa i fibroskopa). Provjera rezolucije obavezna je prije svakog ispitivanja. Provjerom rezolucije se nastoji odrediti da li je određena kombinacija sonde i kamere endoskopa primjerena za planirano ispitivanje. Ova provjera je prvenstveno predviđena za kontrolu boroskopa i ograničenog povećanja slike. Boroskop je kruti instrument i tijekom ispitivanja se može kretati u samo jednoj osi (os u smjeru sonde). Kod fibroskopa se sonda može zakretati u različitim smjerovima i može se mijenjati udaljenost sonde od ispitne površine po potrebi, pa provjera rezolucije nije obavezna.



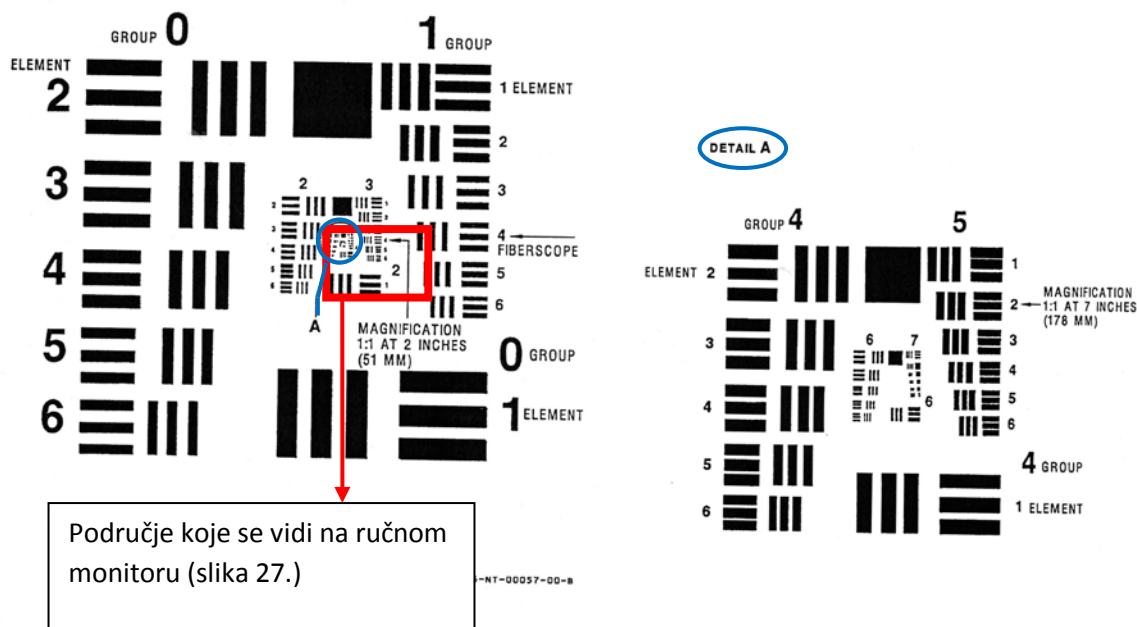
Slika 25. Provjera rezolucije fibroskopa (sonde)

Prema točki 5. B., NDTM priručnika, izvršna je provjera rezolucije fibroskopa, pomoću *Boroscope Resolution Monitora*. Pričvršćivanjem sonde **PXT650FF** na udaljenost ( $d_{\min} \approx 50$  mm, u graničnom području fokusa sonde), moglo se razabrati crtice do grupe 5 i elementa 3 (Slika 26), što prema priručniku ulazi u dozvoljene granice za ispravno ispitivanje. Inače, minimalna granica je element 4, grupe 1. Uz provjeru rezolucije fibroskopa, provjerena je i osvijetljenost površine pomoću fotometra. Dozvoljene minimalne vrijednosti za opći pregled su 160 lx, dok je za detaljnije preglede minimalno 500 lx.

Fotometrom je dobiveno 13640 lx na udaljenosti  $d_{\min} = 50$  mm, što je i više nego zadovoljavačuće za ovu vrstu ispitivanja, gledajući na dimenzije lopatica, Slika 27. Sonde su tijekom ispitivanja na pozicijama udaljenim maksimalno 10-20 mm od napadne ili izlazne ivice.



NON DESTRUCTIVE  
TEST MANUAL

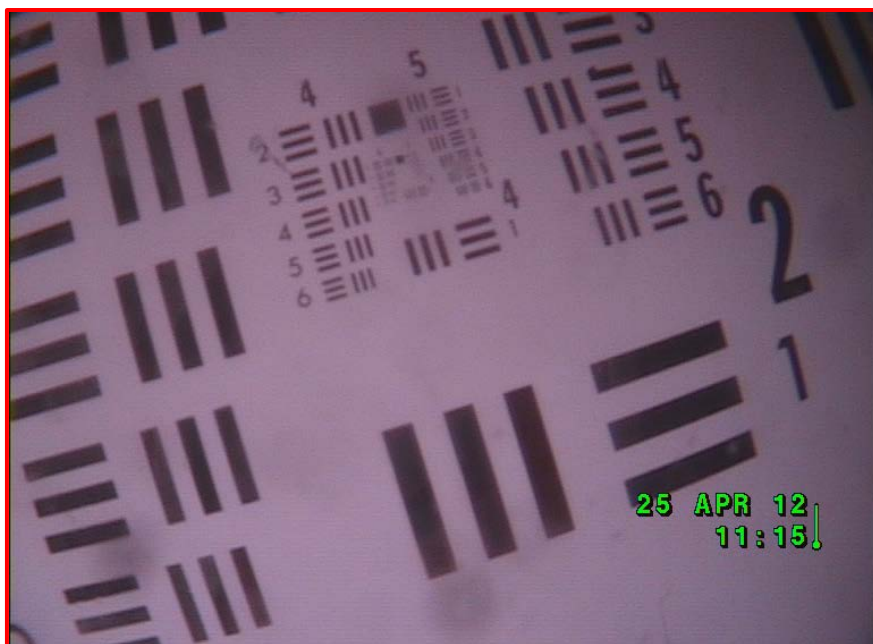


Resolution Target  
Figure 7 (Sheet 1 of 2)

72-00-00

Part 7  
Page 20  
May 31/99

Slika 26. Resolution Target



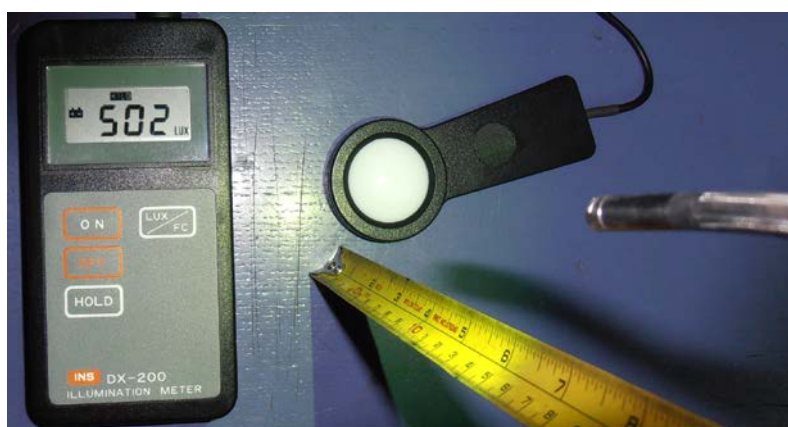
Slika 27. Slika sa ručnog monitora



Slika 28. Dimenzija lopatice visokotlačne turbine



$d_{\min} = 50 \text{ mm}$ ,  
 $E = 13640 \text{ lx}$



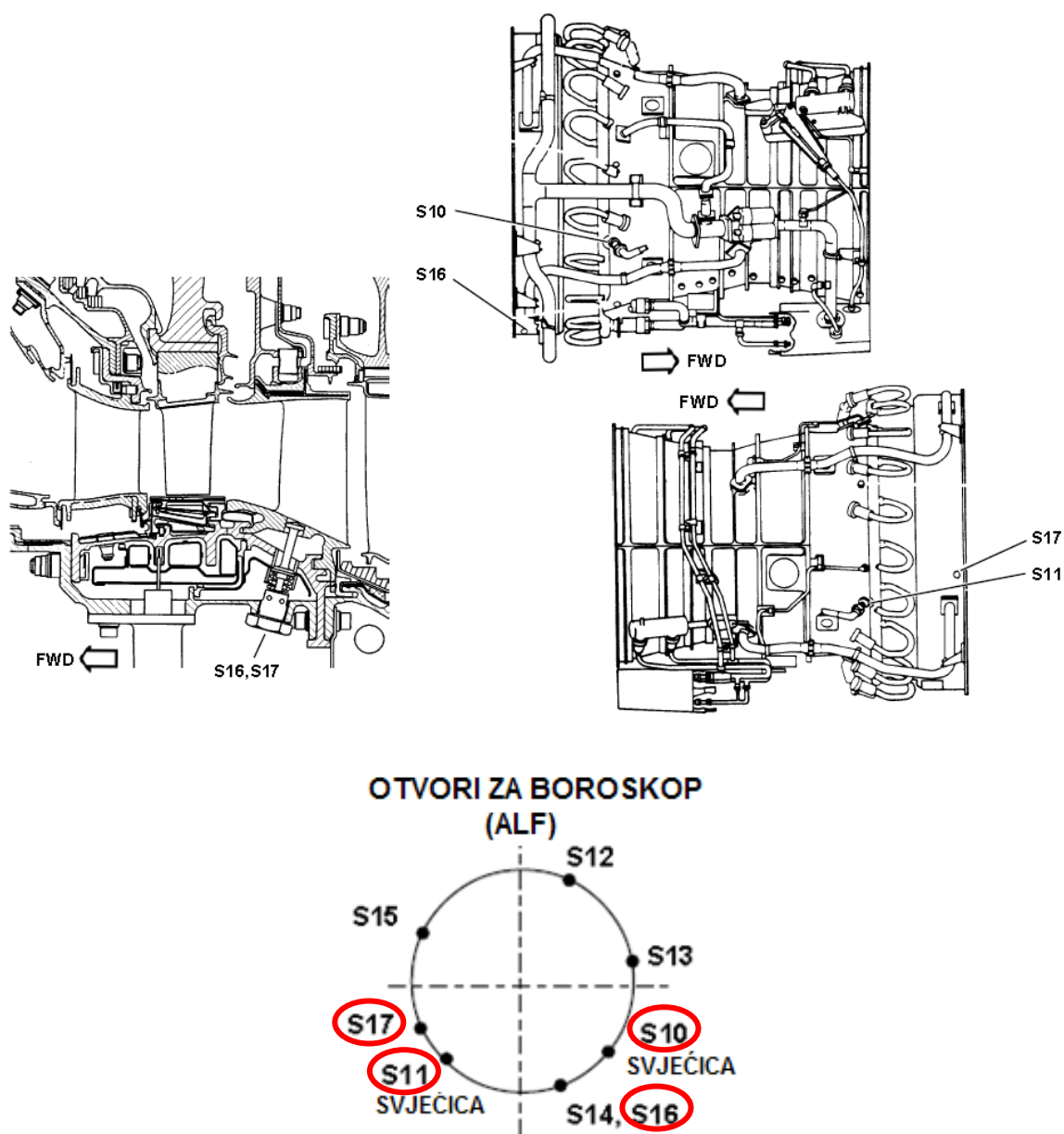
$d = 200 \text{ mm}$ ,  
 $E_{\min} \approx 500 \text{ lx}$

Slika 29. Fotometrija opreme

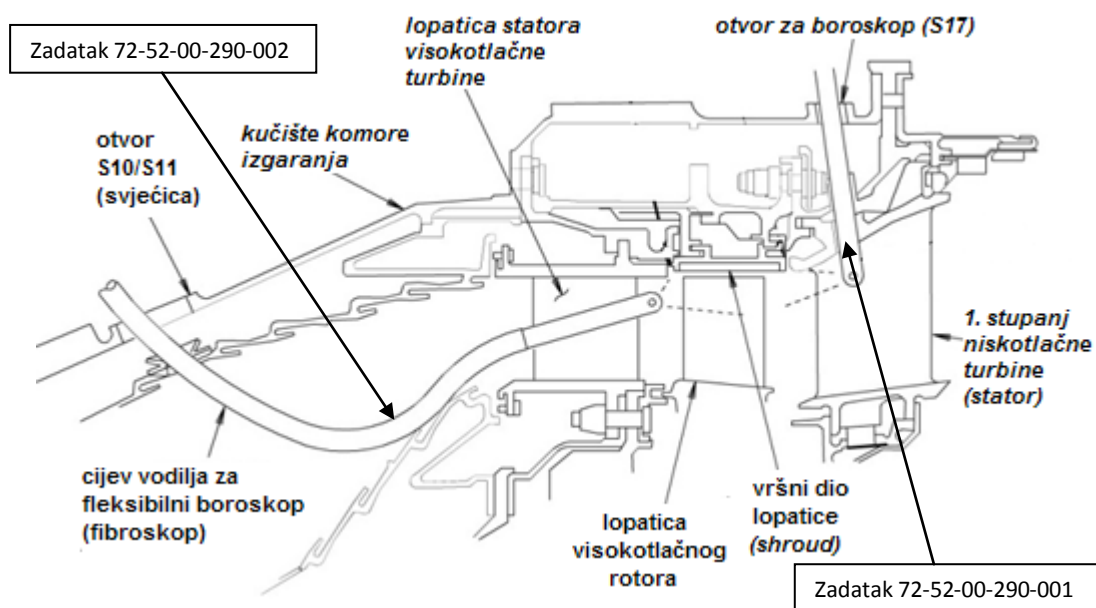
## Otvori

Otvori svijećica u komori izgaranja (S10 i S11) služe, isto kao i otvori za boroskop, u ispitivanju napadnih ivica lopatica visokotlačne turbine. U području turbine nalaze se dva otvora (S16 i S17) kroz koje se ispituju izlazne ivice lopatica turbine.





Slika 30. Otvori za boroskop i njihove lokacije,  
ALF (*aft looking forward*) – pogled od stražnjeg dijela zrakoplova prema naprijed

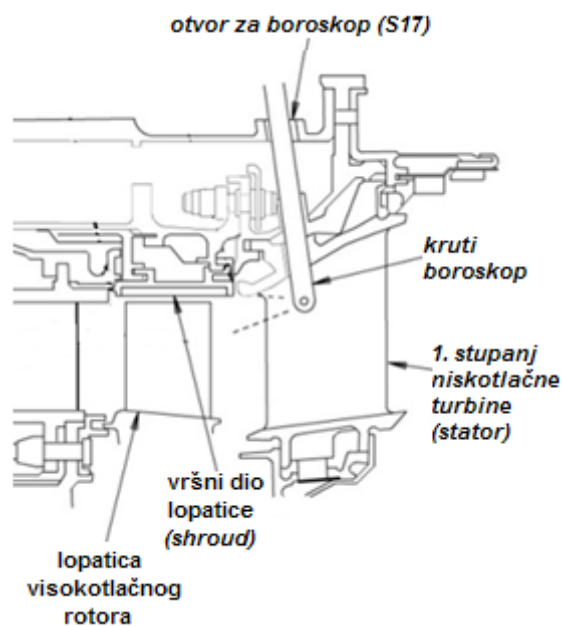


Slika 31. Pozicije sonde kod ispitivanja lopatica visokotlačne turbine

Ispitivanje rotora visokotlačne turbine krutim boroskopom je ograničeno na vidljive dijelove. Ako se ne uoče nikakve nepravilnosti na vidljivim površinama, boroskopsko ispitivanje je završeno.

U slučaju kad su tijekom ispitivanja boroskopom uočene nepravilnosti ili sumnjive indikacije na napadnim ivicama lopatica (prvi stupanj rotora), za dodatno ispitivanje se uzima fibroskop. Fibroskopom se do mjesta ispitivanja dolazi kroz otvor svijećica na komori izgaranja, kao na slici 29, zadatak 72-52-00-290-002.

Lopatice koje su prilikom eksploatacije radile na temperaturama preko 990 °C, izravno se smatraju ne pravilnim i i moraju biti skinute s rotora i zamijenjene [2].



Slika 32. Ispitivanje po 72-52-00-290-001

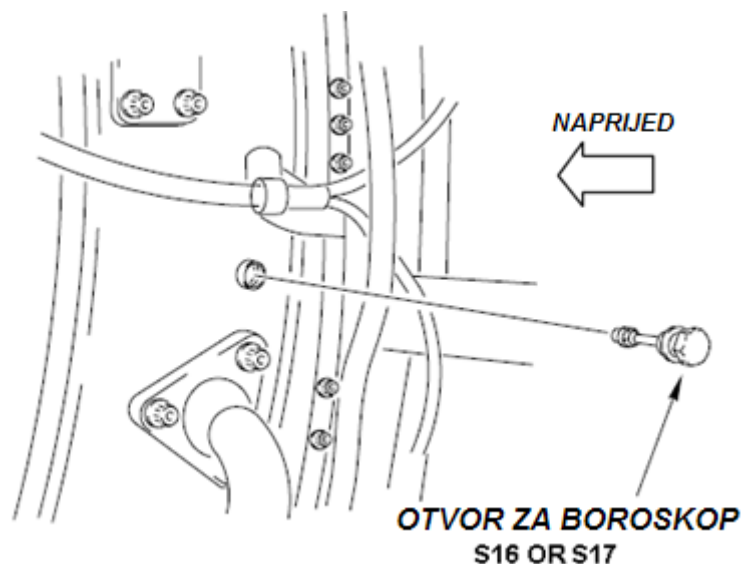


Slika 33. Vrh lopatice s kontrolnim zarezima, 72-52-00-290-001



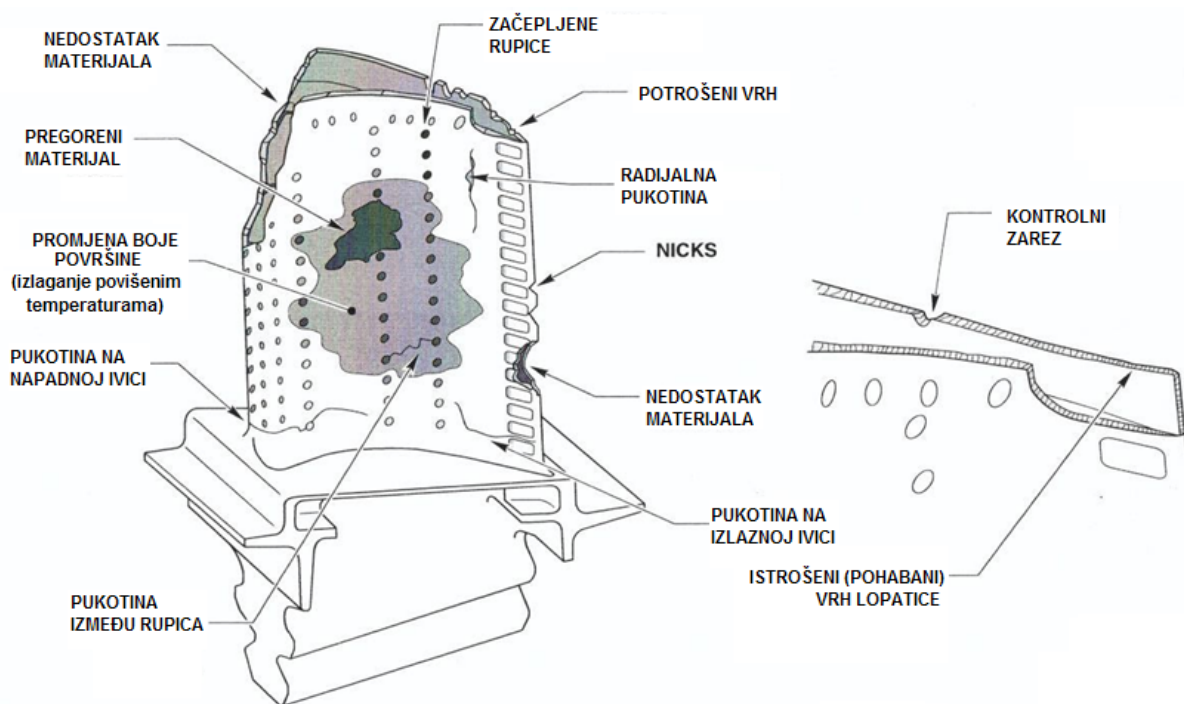
Slika 34. Izlazne ivice lopatica, 72-52-00-290-001

Zadatak 72-52-00-290-001 se odnosi na ispitivanje *izlaznih ivica, vrhova, koveksnih i konkavnih površina* lopatica. Fibroskopom se ulazi kroz dva otvora za boroskop, S16 i S17, smještene odmah pored spoja kućišta komore izgaranja i turbinskog dijela motora (prirubnica komore izgaranja).

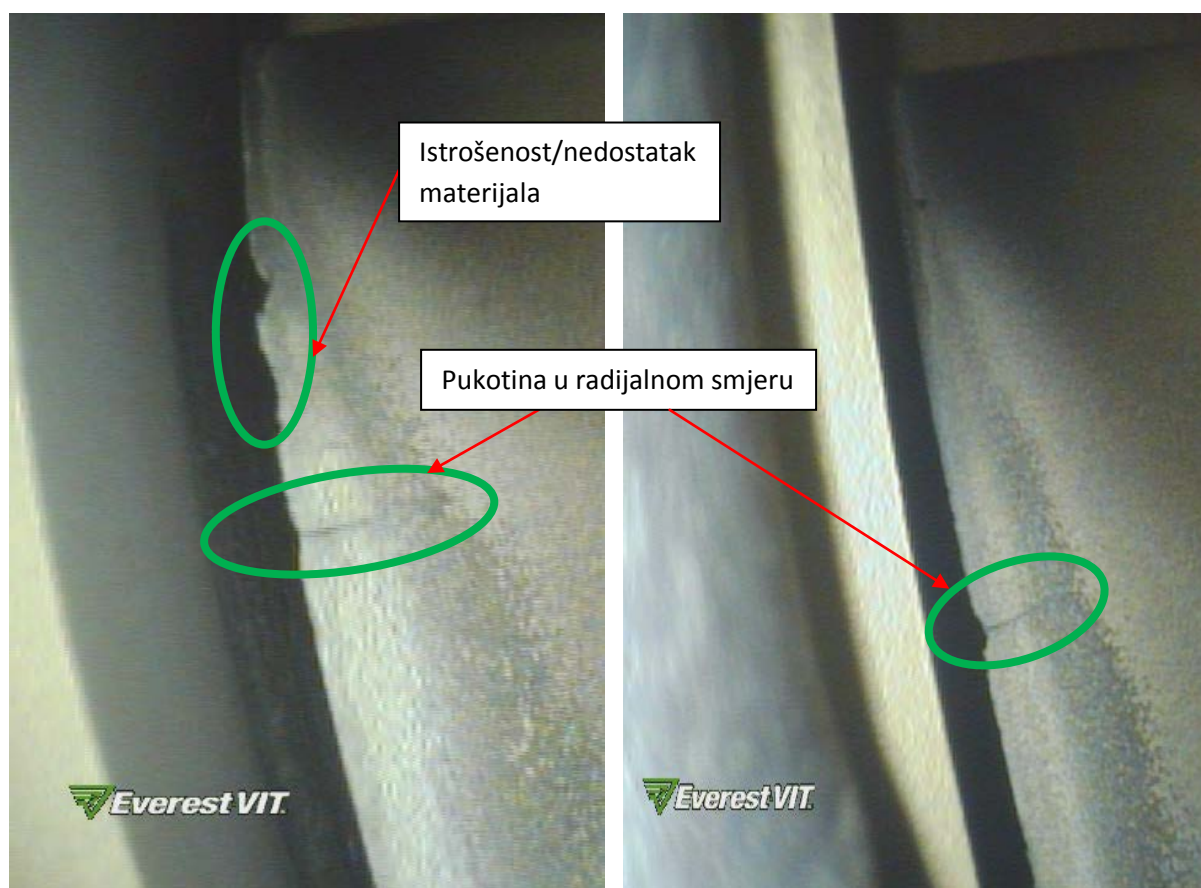


Slika 35. Otvor za boroskop; za Zadatak 72-52-00-290-001

Ispitivanjem prema zadatku 72-52-00-290-002, gledaju se *napadne ivice*, *konveksne i konkavne površine*, *vrhove lopatica*, *baze lopatica* te *stjenke kućišta*. Boroskopom je ispitivanje napadnih ivica lopatica nemoguće. Za to se koristi fibroskop kroz otvore za svijećice na komori izgaranja.

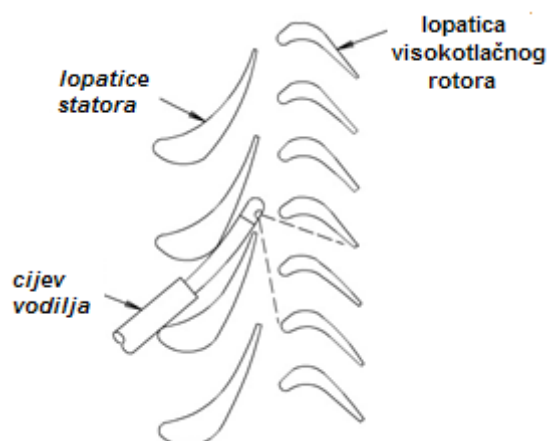


Slika 36. Moguće nepravilnosti na lopaticama rotora visokotlačne turbine



Slika 37. Nepravilnosti na vrhovima lopatica visokotlačne turbine

Prije umetanja fibroskopa, kroz otvore svijećica na komori izgaranja pozicioniramo plastičnu cijev vodilju. Plastična cijev se namijesti tako da joj se drugi kraj nalazi između dvije lopatice statora (*HPT nozzle guide vanes*). Sada se kroz plastičnu cijev gura sonda fibroskopa, dok ne dođe do pozicije gdje se vide napadne ivice lopatica turbine.



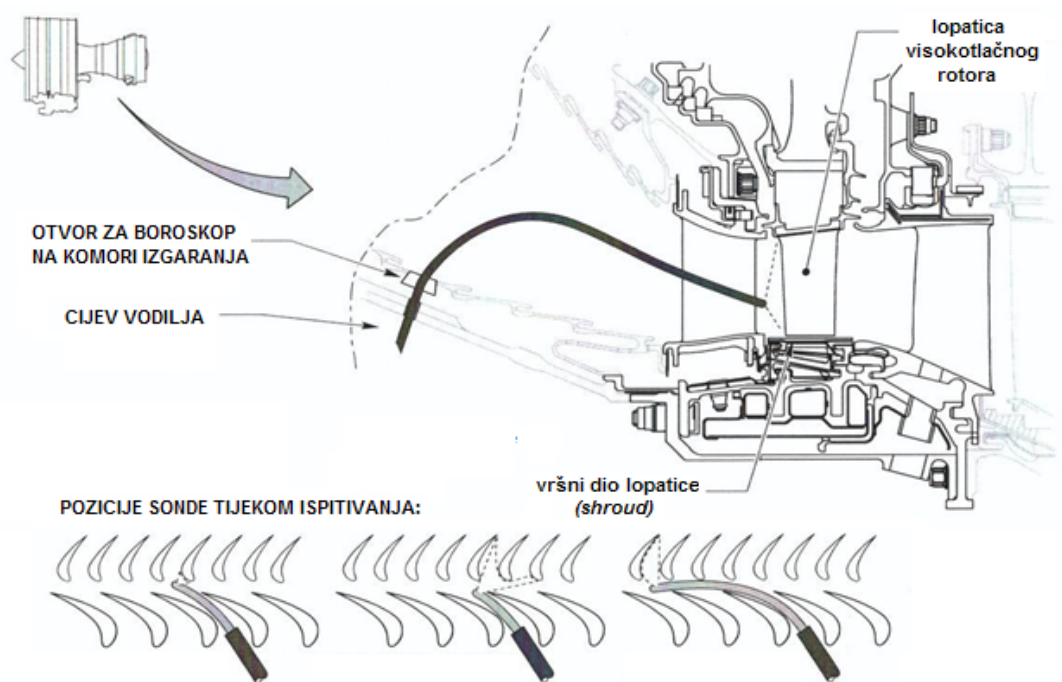
Slika 38. Položaj sonde kod ispitivanja napadnih ivica lopatica



Treba se obratiti pažnja, da se rotor turbine ne okreće dok je fibroskop u njegovoj blizini, jer može lako doći do prekidanja cijevi. U tom se slučaju motor treba rastaviti, a turbinu očistiti od ostataka fibroskopa.



Slika 39. Primjeri rezultata ispitivanja, 72-52-00-290-002



Slika 40. Ispitivanje lopatica s prednje strane (iz komore izgaranja, 72-52-00-290-002)

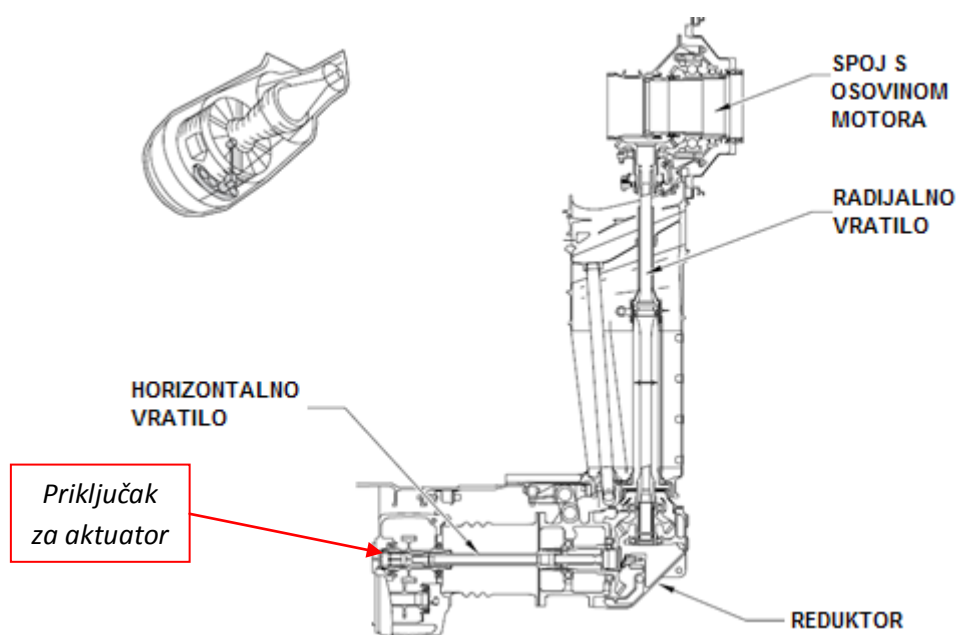
### Priprema prije samog ispitivanja:

1. Upozoriti osoblje u radnoj okolini da je ispitivanje u tijeku, postaviti natpise „ispitivanje u tijeku“).
2. Provjeriti da je motor ugašen najmanje 5 min.
3. Provjeriti da je sklopka ENG/FADEC PWR isključena.
4. Otvoriti vrata kućišta ventilatora.
5. Otvoriti vrata kućišta inverznog potiska (*thrust reverser*).

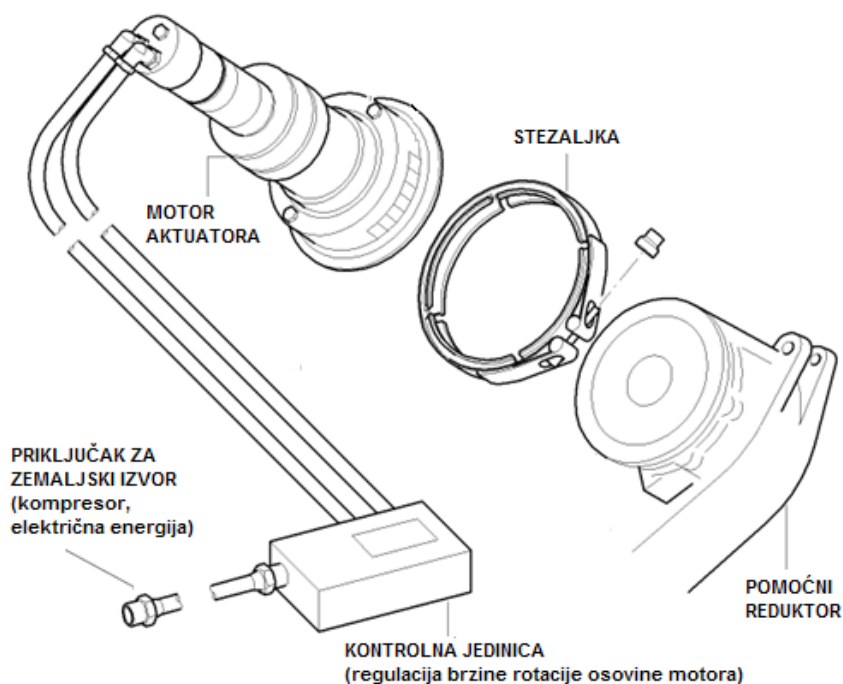
## Radne upute i granice upotrebljivosti HPT lopatica:

Koraci ispitivanja su u AMM-u opisani u detalje. Ovdje su navedeni najbitniji koraci kojima se može dobiti slika ispitivanja [4].

- A. Prije početka ispitivanja uvijek se mora pregledati stanje monitora i endoskopa. Treba provjeriti jesu li u radnom stanju, kalibrirani i spremni za ispitivanje (NDTM 72-00-00, *part 7*).
- B. Ispitivanje započinje otklanjanjem jedne od svijećica na komori izgaranja (72-52-00-290-002) ili zatvarača na otvoru S16/S17 (72-52-00-290-001).  
 UPOZORENJE: Pažljivo rukovati sa svijećicom. Kontakti mogu biti električno nabijeni i može doći do oštećenja keramičkog dijela svijećice.
- C. Namijestiti aktuator ili ključ s polugom na pomoćni reduktor. Ključ se okreće u smjeru kazaljke na satu, a brzinu rotacije treba prilagoditi iskustvu ispitivača.



Slika 41. Presjek i položaj pomoćnog reduktora



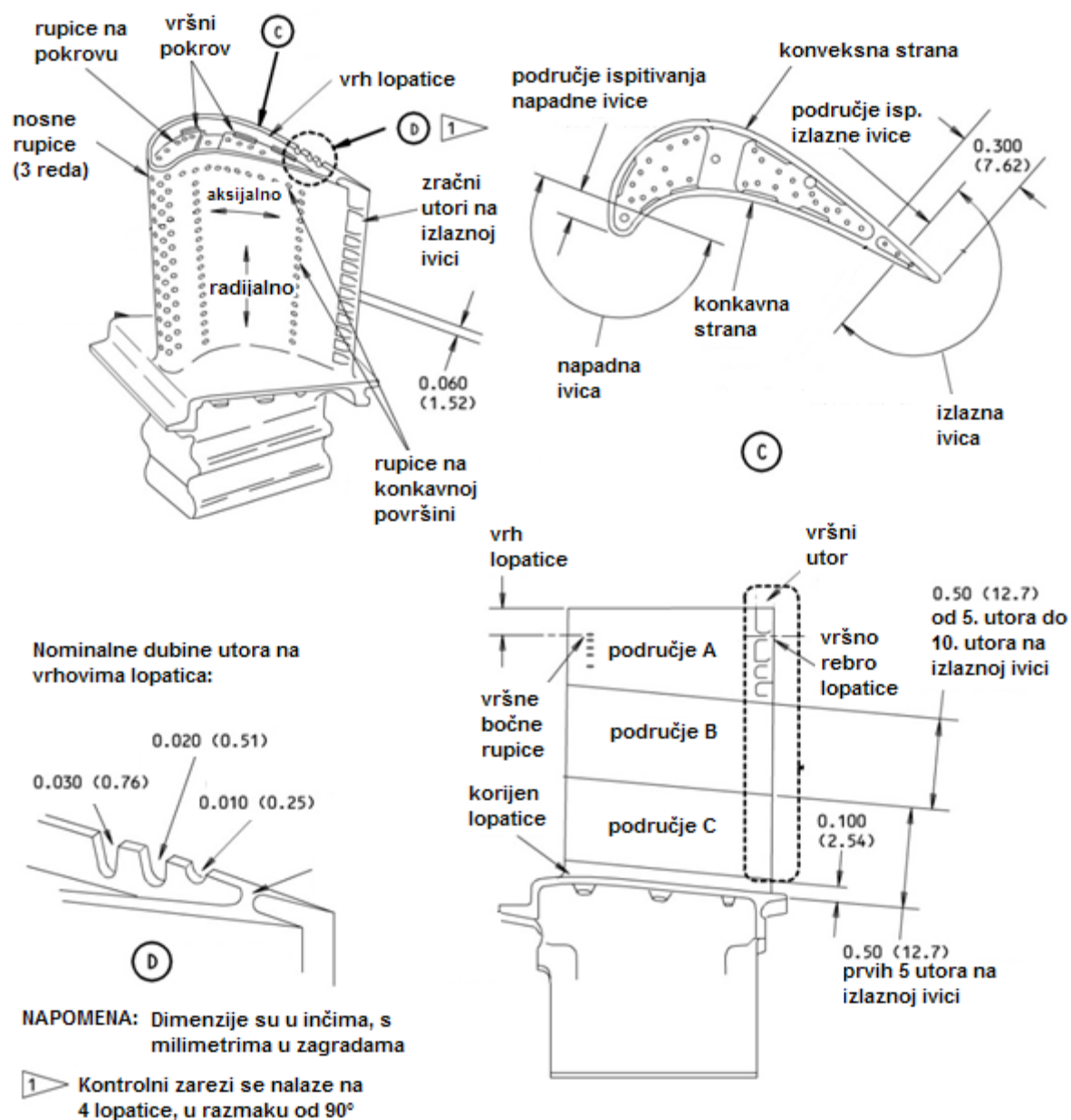
Slika 42. Aktuator (Accessory Gearbox)

- D. U slučaju zadatka 72-52-00-290-002, prije umetanja fibroskopa kroz otvore za svijećice, treba namjestiti plastičnu cijev za pozicioniranje sonde. Pokazivač na cijevi treba se usmjeriti prema kraju motora. Tako se vrh cijevi pozicionira u blizinu statorskih lopatica visokotlačne turbine. Nakon toga se fibroskop polako gura kroz plastičnu cijev sve do njezinog kraja.
- E. Zatim treba vrh fibroskopa gurnuti između lopatica statora, tako da su vidljive napadne ivice lopatica rotora.
- F. Za zadatak 72-52-00-290-001:
- Okretati rotor u smjeru kazaljke na satu i gledati u izlazne ivice lopatica visokotlačne turbine. Stati kod svake lopatice kako bi se uočile bilo kakve nepravilnosti.  
NAPOMENA: Kako bi se rotor okretao u smjeru kazaljke, aktuator rotacije se mora okretati u suprotnom smjeru.
  - Evidentirati dubinu ureza (eng. *notch*) za procijenu trošenja na četiri urezane lopatice.  
NAPOMENA: Postoje četiri urezane lopatice jedna nasuprot druge (razmak od 180°). Urezi pokazuju količinu trošenja i struganja vrhova lopatica. Ako urezi nisu vidljivi, lopatice su još uvijek u granicama upotrebljivosti, i ne treba odmah pretpostavljati da je razmak između vrhova lopatica i kućišta prevelik, odnosno da je loša efikasnost turbinskog dijela.

Za zadatak 72-52-00-290-002:

- Okretati rotor u smjeru kazaljke na satu. Zastati kod svake lopatice kako bi se uočile bilo kakve nepravilnosti.  
NAPOMENA: Nije lako vizualno procijeniti kada su začepljene rupice za hlađenje. Prividno začepljene rupice, i dalje su dopuštene, ako su pukotine, erozija i sagorena površina u granicama upotrebljivosti. Pukotine koje nisu potpuno identificirane zbog sitnih nakupina iz motora mogu biti špricane posebnom otopinom za odstranjivanje.





Slika 43. Specifikacije lopatica visokotlačne turbine

G. Ispitati sljedeće:

### 1. Izlazne ivice lopatica:

NEPRAVILNOSTI:	MAKSIMALNE GRANICE UPOTREBLJIVOSTI:
Pukotine u području B i C.	Nisu upotrebljive.
Pukotine u području A.	Dozvoljena jedna pukotina, 2,5399 mm.
Nedostajanje materijala na vrhu izlazne ivice.	Bilo koja količina materijala iznad zadnjeg rebra.
Začepljeni prolazi zraka u području C.	Nisu upotrebljive.
Začepljeni prolazi zraka u području B.	Dozvoljen jedan začepljeni prolaz.
Začepljeni prolazi zraka u području A.	Dozvoljen jedan začepljeni prolaz.
Zarezi i udubljenja, područje A.	Dozvoljeno, ako nema pukotina ili savinuća.
Zarezi i udubljenja, područja B i C.	Tri dozvoljena, dubine 1,2699 mm i razdvojena jedan od drugog za 3,1749 mm, ako nema pukotina ili savinuća.

### 2. Napadne ivice:

NEPRAVILNOSTI:	MAKSIMALNE GRANICE UPOTREBLJIVOSTI:
Aksijalne i radijalne pukotine u području A.	Dozvoljene do duljine 1,2699 mm, i ako ne spajaju dvije i više rupica.
Aksijalne i radijalne pukotine u područjima B i C,	Nisu upotrebljive.
Zarezi i udubljenja, područje A.	Dozvoljeni.
Zarezi i udubljenja, područje B.	Dozvoljeni.
Zarezi i udubljenja u području C, uključujući radijus korijena.	Tri dozvoljena, dubine 1,2699 mm i razdvojena jedan od drugog za 3,1749 mm, ako nema pukotina ili savinuća.
Aksijalne pukotine na ivici ili na rupicama za hlađenje u području B i C.	Nisu upotrebljive.
Radijalne pukotine ivice ili na ivici ili na rupicama za hlađenje u području B i C.	Nedozvoljene u području C, jedna dozvoljena duljine 0,7619 mm u području B.

### 3. Vrh lopatica:

NEPRAVILNOSTI:	MAKSIMALNE GRANICE UPOTREBLJIVOSTI:
Radijalne pukotine	Dozvoljene, maksimalne duljine 5,0799 mm.
Savinuća, zakrivljenost ili nedostajanje materijala	Dozvoljena, ako su duljine unutar 5,0799 mm mjerene od vrha.
Neuobičajeno trošenje vrha izlazne ivice	Dopušteno do dna <i>top slot</i> . Iznad toga, dozvoljeno je maksimalno 20 dodatnih radnih ciklusa.

### 4. Konkavne i konveksne površine :

NEPRAVILNOSTI::	MAKSIMALNE GRANICE UPOTREBLJIVOSTI:
Zarezi i udubljenja, područje A.	Dozvoljena, maksimalno 6,3499 mm duge.
Zarezi i udubljenja, područje B.	Dozvoljena, maksimalno 2,5399 mm duge.
Zarezi i udubljenja, područje C.	Tri dozvoljena, dubine 1,2699 mm i razdvojena jedan od drugog za 3,1749 mm, ako nema pukotina ili savinuća.
Akijalne pukotine na konkavnoj strani aeroprofila, unutar 17. 7799 mm od izlazne ivice i iznad sedmog utora od platforme.	Dozvoljene, maksimalne duljine 6,3499 mm, ako ne dodiruju izlaznu ivicu.
Pukotine, druga područja	Nisu upotrebljive.

### 5. Aeroprofil lopatice za:

NEPRAVILNOSTI:	MAKSIMALNE GRANICE UPOTREBLJIVOSTI:
Deformacije ili indikacije sagorijevanja i topljenja površine.	Nisu upotrebljive.
Nedostajanje <i>codep</i> premaza.	Dozvoljeno.

- H. Kada je pregled gotov, isključiti projektor, izvaditi fibroskop i plastičnu cijev.
- I. Nanijeti malu količinu paste za podmazivanje na otvor boroskopa.
- J. Montirati svijećicu ili zatvarač i spojiti kontakte svijećice.
- K. Otkloniti ključ s aktuatora
- L. Ponovo montirati zaštitnu pločicu na aktuator
  - a) Nanijeti pastu za podmazivanje na tri vijka zaštitne pločice.
  - b) Pričvrstiti zaštitnu pločicu na aktuator.
- M. Ako je u zadataku 72-52-00-290-001 uočena nepravilnost koja je blizu granice upotrebljivosti, nužno je provesti i zadatak 72-52-00-290-002.

### **Završavanje:**

- A. Provjeriti da li je mjesto rada čisto, bez zaboravljenih dijelova opreme.
- B. Zatvortiti vrata kućišta reversera potiska.
- C. Zatvoriti vrata kućišta ventilatora.
- D. Skinuti upozorenja o ispitivanju.

## 5. Analiza rezultata ispitivanja

### Uvjeti za vrijeme ispitivanja:

Ispitivanje je provedeno u prostorijama tvrtke *Croatia Airlines*, u vremenskom periodu od listopada 2011. g. do svibnja 2012.g. Prilikom ispitivanja nisu korištene metode čišćenja, niti odstranjivači prljavštine s ispitivanih površina. Također nije bilo nikakve dodatne pripreme površine. Ispitivanje je provedeno prilikom planiranog linijskog pregleda i prema radnim uputama u AMM-u.

### Oprema korištena tijekom ispitivanja:

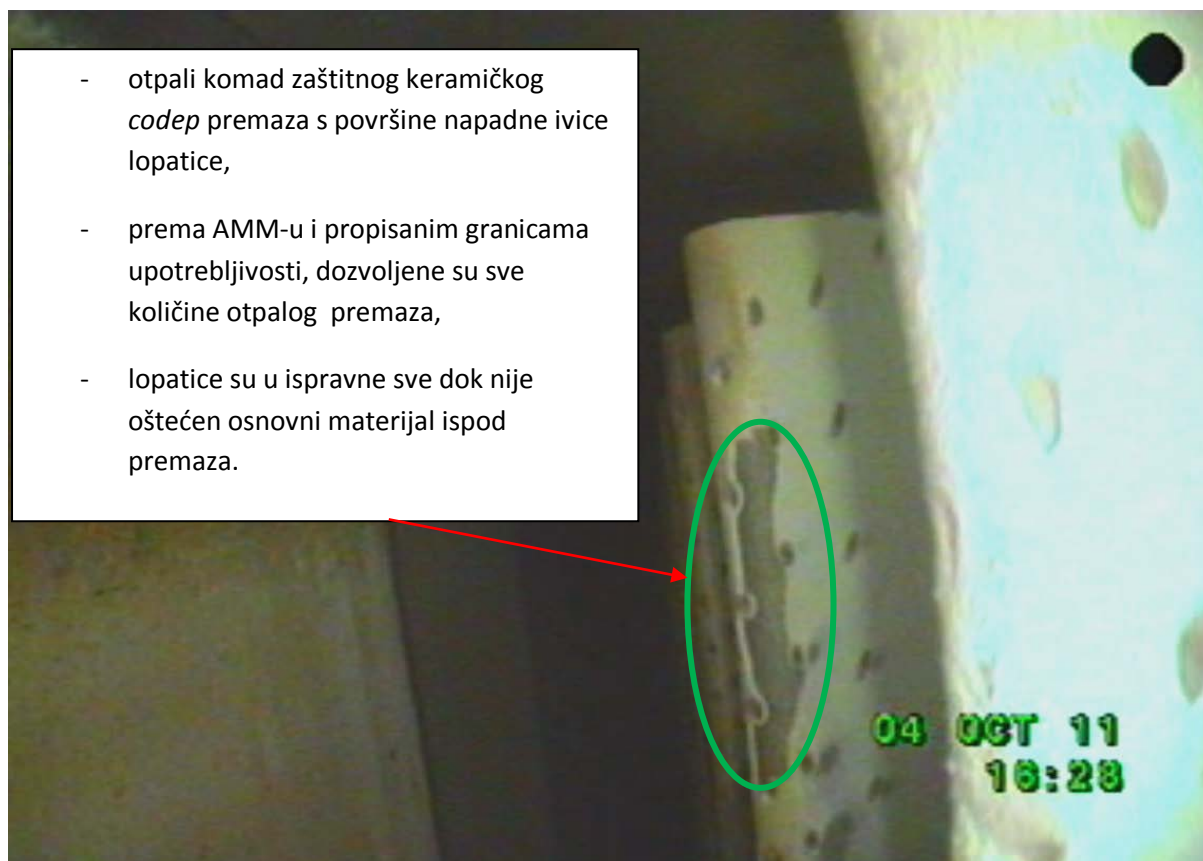
Oprema je opisana u 2. poglavlju (vidi str. 8).

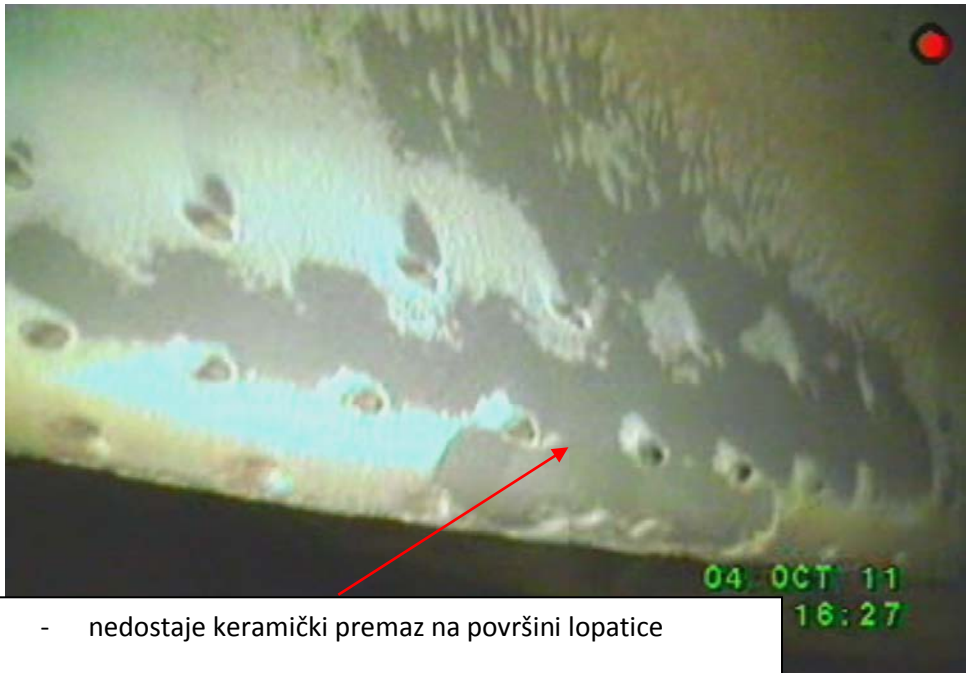
Fibroskop/videskop: XLTM40 PRO Plus, proizvođač *Everest VIT*

Sonda: PXT650FF, *forward*, dubina vidnog polja (fokus): 50 mm -  $\infty$

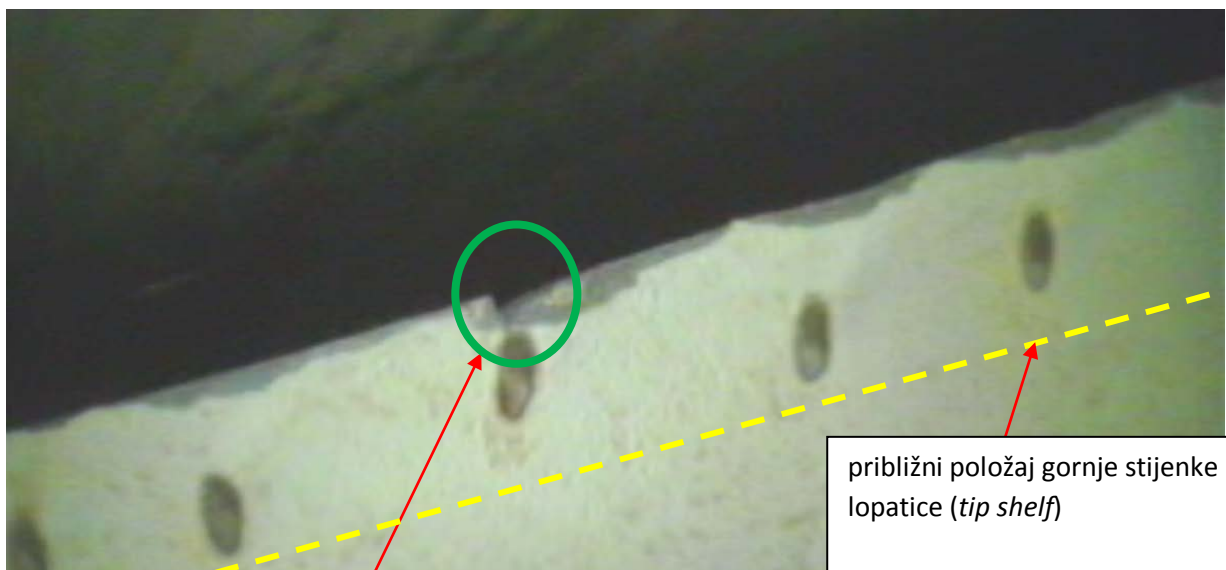
Izvor svjetlosti: metal-halid žarulja, 50 W, 2600 lm

### Rezultati:





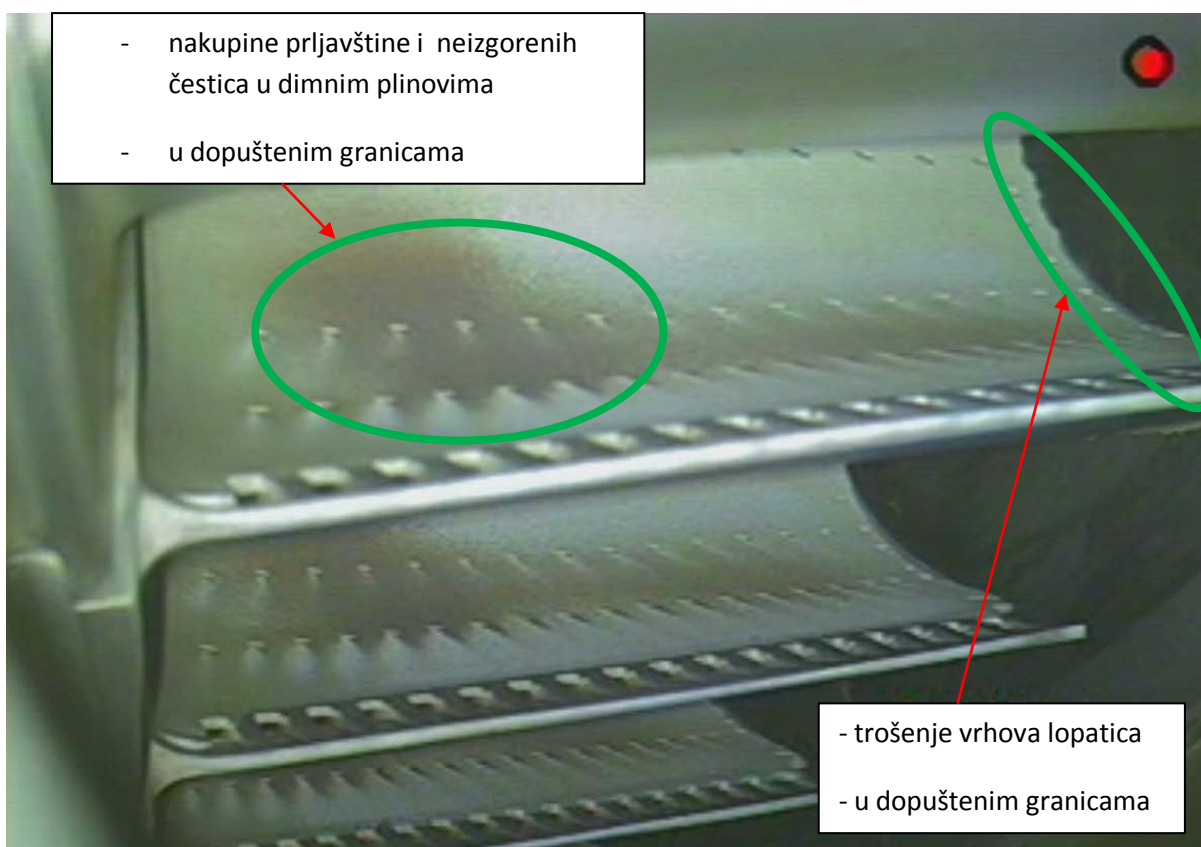
- nedostaje keramički premaz na površini lopatice
- lopatica je ispravna



- indikacija trošenja vrha lopatice, kombinacija otpadanja zaštitnog premaza, savijanja i otpadanja materijala lopatice prilikom struganja vrha i stijenke kućišta
- indikacije su iznad *tip shelfa* (gornja stijenka lopatice) i prema AMM-u su u dozvoljenim granicama.



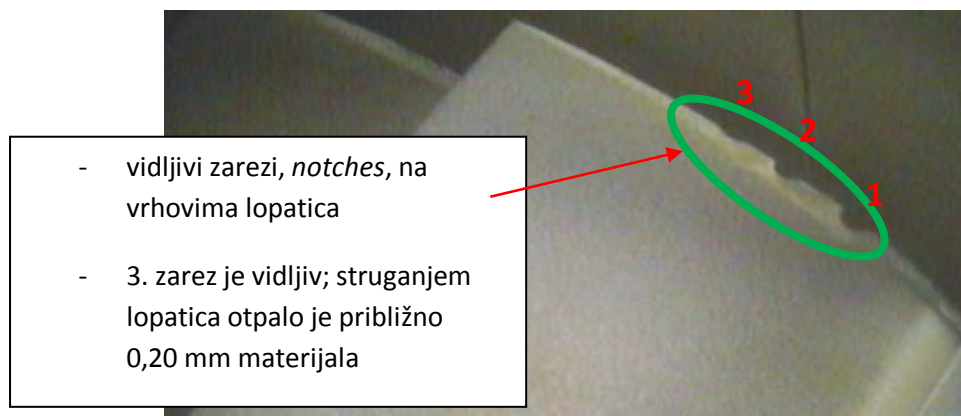
- tipični rezultat trošenja vrhova lopatica
- gubitak zaštitnog premaza, uz minimalno oštećenje osnovnog materijala
- ispravna lopatica



- nakupine prljavštine i neizgorenih čestica u dimnim plinovima
- u dopuštenim granicama

- trošenje vrhova lopatica
- u dopuštenim granicama



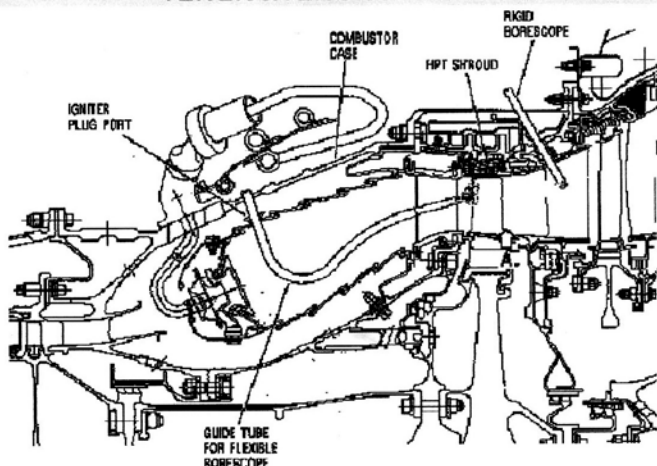


Na sljedećoj strani se može vidjeti primjer dokumentacije ispitivanja visokotlačne turbine temeljene na radnim uputama tvrtke *Croatia Airlines*. Uz ispitivanje lopatica visokotlačne turbine, često se ispituje i prvi stupanj niskotlačne turbine, odnosno lopatice statora 1. stupnja niskotlačne turbine. U ovo slučaju to se nije ispitivalo.



<b>CROATIA AIRLINES</b> <small>TECHNICAL SERVICES</small>		<b>BORESCOPE INSPECTION</b>		
<b>WO / DEFECT №</b>	<b>ENGINE SERIAL №</b> 779548	<b>DATE</b> 4 / 10 / '11	<b>TYPE</b> CFM 56-5A	<b>PAGE</b> 7 / 9
<b>BORESCOPE INSPECTION</b>		<b>AIRCRAFT MAINTENANCE MANUAL 72-00-00</b>		

**72.52.00/72.53.00 HPT BLADES & SHROUDS, LPT1 NOZZLES**



Position	Pieces Check	View	Qty	Remarks
S10/S11 118°/244° IGNITER PLUG	HPT BLADES	LEADING EDGE	80	IN LIMITS
S17/S18 165°/255°	HPT BLADES	TRAILING EDGE		IN LIMITS
BLADES/NOTCHES QTY.				
S10/S11 S17/S18	HPT SHROUDS	STATUS	SERVICEABLE	
S17/S18 165°/255°	LPT NOZZLES STAGE 1	LEADING- / TRAILING EDGE		

72.52.00 HPT BLADES STATUS		72.53.00 HPT SHROUDS & LPT1 NOZZLES STATUS	
<b>REMARKS:</b> LIGHT TIP RUB ABOVE TOP SHELF AND MISSING COATING  ALL 3 NOTCHES ARE VISIBLE		<b>REMARKS:</b>	
SERVICEABLE <input checked="" type="checkbox"/>	VISA&DATE:	SERVICEABLE <input checked="" type="checkbox"/>	VISA&DATE:
NOT SERVICEABLE <input type="checkbox"/>		NOT SERVICEABLE <input type="checkbox"/>	

Prepared by: B. Vuković, ENG	REVISION		VALIDATED BY:
Signature:	DATE	02 / 05	ID / SIGNATURE Potpis

## 7. Zaključak

U ovom radu prikazana je primjena vizualne metode nerazornog ispitivanja u održavanju motora CFM56-5B. Vizualnim ispitivanjem kontinuirano se provjerava stanje komponenti zrakoplova, i nastoje se uočiti nepravilnosti koje odstupaju od propisanih granica sigurnosti. Vizualna ispitivanja su česta i vrlo bitna kod pregleda stanja motora. Osim što pregled traje puno kraće jer nema nepotrebnog rastavljanja motora, različitom se kombinacijama opreme dobivaju precizne dijagnoze o stanju komponente. Danas u turboventilatorskim motorima, prilikom uobičajenih eksploatacijskih uvjeta motora, kao materijal još uvijek dominantne legure metala, a nepravilnosti se najčešće javljaju na samoj površini materijala. Tako su se rezultati vizualnog ispitivanja s vremenom dokazali kao vrlo pouzdani. U većini slučajeva nisu potrebna dodatna ispitivanja unutrašnjosti materijala drugim metodama (magnetska, vrtložne struje, ultrazvučna) nerazornog ispitivanja. Komponenta se uglavnom zamjenjuje ili uočavanjem nepravilnosti vizualnom metodom (boroskopija) ili istekom propisanog životnog vijeka. Osim što se još uvijek pokazuje kao jedna od najzastupljenijih nerazornih metoda u održavanju zrakoplova, vizualno ispitivanje unutrašnjosti raznih dijelova zrakoplova, a najčešće motora, uveliko smanjuje troškove održavanja. U zrakoplovstvu, opće je poznato kako je zrakoplov na zemlji najskuplji zrakoplov. Kako je već prije navedeno, nepotrebna rastavljanja zrakoplova, tj. motora, vizualnim su ispitivanjem eliminirana. Tako su vremena pregleda puno manja, a zrakoplov provodi više vremena zraku. To je u principu jedan od ciljeva u procesu održavanja, pa tako i vizualnog ispitivanja. Naravno, na prvom je mjestu uvijek osigurati pouzdanost i ispravnost sustava (motora, zrakoplova u cjelini), odnosno u kontekstu vizualnog ispitivanja, važno je redovnim pregledima, i s iskusnim ispitivačima te dobrim izborom ispravne opreme, doći do točne dijagnoze prilikom ispitivanja nekog dijela, odnosno komponente zrakoplova.

## 8. Literatura

- [1] „Visual Inspection, Level I/II“, *British Institute of NDT*, (2000.)
- [2] „Borescope Inspection CFM56-5B, Training Manual“, *CFM International*, (2000.)
- [3] „Borescope Inspection CFM56-ALL, Training Manual“, *CFMI*, (revisited September/2003.)
- [4] „Aircraft Maintenance Manual“, *Airbus - Croatia Airlines*, (2011.)
- [5] „Training Manual“, *Everest Vit*, 2004.
- [6] „Non-destructive Testing Manual, CFM56“, *CFM International*, (revisited May/1999.)
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_efficacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy)
- [8] <http://www.cfm56.com/products/cfm56-5b/cfm56-5b-technology>
- [9] „The Light Measurement Handbook“, *Alex Ryer, International Light Technologies*, (1997.)

## 9. Prilozi

### Definicije veličina:

*Svjetlosni tok* je energija koju emitirana izvor tijekom jedne sekunde. Mjerna jedinica je *lumen (lm)*

*Intenzitet* svjetla, predstavlja snagu zračenja (svjetlosni tok) koju emitira izvor svjetla u određenom smjeru, mjerenom u steridijanima. Jedinica je *candela (cd)*.

*Svjetljivost*, odnosno *luminacija*, je sjajnost osvjetljenje ili svjetleće površine kako je vidi ljudsko oko. Mjerna jedinica za luminaciju je  $[cd/m^2]$

*Osvjetljenost* je mjerilo za količinu svjetlosnog toka koja pada na određenu površinu. Mjerna jedinica je *lux*. Jedan *lux* je osvjetljenje jedinične površine ( $1 m^2$ ) udaljene jedan metar od izvora svjetla jakosti  $1 cd$ .

Veličina	Oznaka	Formula	Mjerna jedinica
Jakost svjetlosti / Intenzitet	$I$	$I = \frac{\phi}{\Omega}$	[cd]
Svjetlosni tok	$\Phi$	$\phi = I \times \Omega$	[lm]
Osvjetljenost	$E$	$E = \frac{\phi}{A}$	[lx]
Luminacija / Svjetljivost	$L$	$L = \frac{I}{A}$	$\left[\frac{cd}{m^2}\right]$

Tablica 1. Veličine svjetlosti

STANJE ISPITNE POVRŠINE (Eng)	DEFINICIJA
Prihvatljivo ( <i>Acceptable</i> )	Zadovoljavajuće za daljnju upotrebu.
Ishabano/oštećeno ( <i>Battered</i> )	Oštećeno kontinuiranim udarcima.
Savinuto ( <i>Bent</i> )	Oštro odstupanje od početne linije ili ravnine, često uzrokovano djelovanjem bočne sile.
Vezano/zaglavljeno ( <i>Binding</i> )	Spriječeno kretanje, zatezanjem i ljepljenjem, uzrokovano visokim temp., ili zaglavljenim stranim predmetom u mehanizmu.
Zakrivljeno ( <i>Bowed</i> )	Lagano odstupanje od početne linije ili ravnine, uzrokovano bočnom silom ili toplinom.
Slomljeno ( <i>Broken</i> )	Silom odvojeno u dva ili više komada.
Izbočeno, udubljeno ( <i>Bulged</i> )	Lokalna udubljenja ili izbočenja, uzrokovana prekomjernim lokalnim zagrijavanjem ili velikom tlaku.
Spaljeno ( <i>Burned</i> )	Destruktivna oksidacija kod visokih temperatura koje materijal ne podnosi.
Oštro ( <i>Burred</i> )	Oštri rubovi na površini materijala.
Karbonizirano ( <i>Carboned</i> )	Nakupine taloga izgorenog ugljika.
Karirano ( <i>Checked</i> )	Površinske pukotine, najčešće uzrokovane višim temperaturama.
Odlomljeno ( <i>Chipped</i> )	Silom odlomljeni rubovi i izbočeni dijelovi materijala.
Zahrđalo ( <i>Corroded</i> )	Postepeno uništavanje materijala kemijskom reakcijom, najčešće oksidacijom.
Napuknuto ( <i>Cracked</i> )	Vidljivo djelomično odvajanje materijala koje može dovesti do loma.
Zakrivljeno ( <i>Curled</i> )	Stanje gdje se vrhovi lopatica kompresora ili turbine zakrivljuju tijekom struganja o površinu kućišta motora.
Udubljeno ( <i>Dented</i> )	Površinski usjeci sa zarivljenim dnom, koji su posljedica udaraca stranih objekata.
Nakupljeno ( <i>Deposits</i> )	Nakupine stranog materijala nekog drugog dijela.
Izobličeno ( <i>Disorted</i> )	Deformacija početne konture nekog dijela, od udarca stranog tijela, naprezanja materijala ili prevelikog zagrijavanja.
Erodirano ( <i>Eroded</i> )	Oдноšenje materijala brzim strujanjem fluida pod tlakom.
Hrapavo ( <i>Frosted</i> )	Gruba obrada površine.
Stopljeno ( <i>Fused</i> )	Zajedno spojena dva materijala. Pomoću topline ili trenja.

STANJE ISPITNE POVRŠINE ( <i>eng</i> )	DEFINICIJA
Struganje ( <i>Gouged</i> )	Skupljanje/struganje materijala, kao posljedica zaglavljenog stranog tijela na površini.
Habano ( <i>Grooved</i> )	Habana površina, s glatkim i zarivljenim rubovima brazdi.
Naznake ( <i>Indications</i> )	Pukotine, uključci, frakture... ne vidljive bez fluorescentnih i magnetskih penetranata
Odvojeno ( <i>Loose</i> )	Odvojeni dio od drugog dijela koji su prije bili spojeni.
Taljeno ( <i>Melted</i> )	Deformcija konfiguracije materijala prilikom izlaganja visokoj temperaturi, tlaku i trenju.
Krivo složeno ( <i>Mismatched</i> )	Netočno povezivanje sva ili više dijelova.
Krivo pozicionirano ( <i>Mispositioned</i> )	Netočna instalacija dijela, rezultira s oštećenjem tog dijela ili dijela s kojim je povezan.
Urezano ( <i>Nicked</i> )	Oštri površinski usjeci uzrokovani udarcima stranih tijela.
Prekomjerna temperatura ( <i>Over-temperature</i> )	Izlaganjem dijela prekomjernoj temperaturi dolazi do promjene boje i izgleda.
Nepotuno ( <i>Part Missing</i> )	Nedostatak potrebnog dijela.
Oguljeno ( <i>Peeled</i> )	Odlamanje površinskih slojeva, premaza, itd.
Izbrazdano ( <i>Pitted</i> )	Pojava malih nepravilnih rupica na površini materijala, zbog korozije ili velikog električnog naboja.
Zakrivljeno ( <i>Rolled-over</i> )	Zakrivljeni metalni rubovi.
Strugano ( <i>Rubbed</i> )	Pomicanje dva dijela, jedan uz drugi, uz pojavu trenja
Ogrebano ( <i>Scored</i> )	Duboke ogrbotine nastale tijekom kontakta s oštrim rubom stranog tijela.
Urezano ( <i>Scratched</i> )	Plitka površinska udubljenja uzrokovana pomicanjem oštrog tijela preko površine. Nema uklanjanja materijala, samo mijenja poziciju.
Odrezano ( <i>Sheared</i> )	Dijeljenje tijela rezanjem.
Rastrgano ( <i>Torn</i> )	Odvajanje dijela silom.
Potrošeno ( <i>Worn Excessively</i> )	Rezultat eksploatacije materijala.

Tablica 2. Stanja površine



## Skice uobičajenih oštećenja:

